

Rapport de stage

« Utilisation d'images Pléiades tri-stéréoscopiques pour la production d'un modèle numérique de surface »

Par : GREUGNY Valentin

MASTER 2

Mention IGT Ingénierie et Gestion Territoriales

Mention Informatique – Spécialité Géomatique

Soutenu le 23 septembre 2014

Membres du jury :

Tuteurs en entreprise : Stéphane DUPUY & Camille LELONG (Cirad UMR TETIS)

Tuteur universitaire : Sylvain LABBÉ (Irstea UMR TETIS)

Membres de l'équipe enseignante :

- Jean-Paul BORD
- Jean-Philippe CHEREL
- Samuel ALLEAUME



Lettre de mission : Stage de Master 2 Géomatique

Nom/Prénom du stagiaire : Greugny Valentin

Durée de la mission: 6 mois

Objectifs:

Cette mission s'intègre dans un projet de recherche dont l'objectif est de développer des outils et procédures fiables nous permettant de mieux caractériser par télédétection spatiale les paysages complexes dans les milieux tropicaux humides. En particulier, il s'attache à mieux identifier, localiser et caractériser les systèmes agroforestiers afin d'en établir une cartographie à la typologie la plus détaillée possible. L'île de Mayotte est considérée comme site pilote de ce projet, en raison de la disponibilité de plusieurs types de données permettant la comparaison et la validation des produits, et de la relative complexité du paysage et des milieux justifiant la possibilité de transposer les méthodes à d'autres sites d'intérêt pour le CIRAD.

Plus particulièrement, les objectifs du présent stage sont de mettre en place une méthodologie de création de modèles numériques de Surface (MNS), Hauteur (MNH) et éventuellement Terrain (MNT) à partir d'images Pléiades tri-stéréoscopiques acquises sur l'île de Mayotte, et valider le potentiel de ces images pour obtenir une information sur la hauteur de la végétation dans le milieu tropical humide de l'île de Mayotte.

Tâches confiées au stagiaire :

- Mettre en place une méthodologie de création d'un MNS à partir d'une acquisition d'image Pléiades tri-stéréoscopique ;
- Créer un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) à partir de ce MNS ;
- Comparer avec ces données avec les MNS, MNT et MNH issu d'une acquisition LiDAR réalisée en 2008 par IGN afin d'en vérifier la cohérence;
- Comparer la qualité de ce MNH avec un autre produit en utilisant le MNT SRTM. Il s'agit de connaître les limites de ce type de produit dans une zone sur laquelle nous ne disposerions pas de MNT précis (en territoire africain ou sud-américain par exemple).

Compétences mises en œuvre :

- Maîtrise des outils géomatiques
- Méthodologie, capacité à mettre en place une chaîne de traitement de données
- Analyse de données
- Esprit de synthèse

Outils: différents modules de différents logiciels, tels que (liste non exhaustive) Erdas Imagine, ENVI, PCI, MicMac, ArcGis 10

Organisme commanditaire : CIRAD-UMR TETIS.

Ce travail a été soutenu par le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS <http://www.insu.cnrs.fr/pnts>), projet n° PNTS-2014-04.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir pour le projet GEOSUD portant la référence ANR-10-EQPX-20

Nom du commanditaire : Stéphane DUPUY

Responsable du stage : Stéphane DUPUY

Tuteurs de stage : Camille LELONG (camille.lelong@teledetection.fr – 04 67 54 87 37) et Stéphane DUPUY (stephane.dupuy@teledetection.fr – 04 67 54 87 27)

Confidentialité du rapport : rapport non confidentiel

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Philippe Tonneau, directeur de l'UMR TETIS pour son accueil au sein de son unité et à la Maison de la Télédétection.

Je souhaite ensuite remercier mes maîtres de stage Camille Lelong et Stéphane Dupuy qui m'ont aidé à me familiariser avec les principes et les logiciels de la télédétection avancée. Je tiens à souligner le fait qu'ils étaient toujours disposés à me conseiller et à m'aider dans l'orientation de mes choix.

Je remercie également Rémy Cresson, Gueric Le Maire et Xavier Lucie avec lesquels j'ai pu travailler l'espace d'un instant lorsque leurs travaux se rapprochaient des miens.

Je voudrais aussi remercier Damien Barache (Exelis-VIS) et Céline Puig (IGN) qui m'ont conseillé au travers de nos échanges par mail respectivement sur les logiciels ENVI et MicMac.

Je souhaite enfin remercier tout le personnel de la MTD. J'ai vraiment apprécié l'ambiance chaleureuse et amicale qui règne au sein de cette structure. Je remercie notamment tous mes collègues de la salle Naert avec lesquels j'ai passé ces 6 derniers mois.

Table des matières

Lettre de mission : Stage de Master 2 Géomatique	1
Remerciements.....	2
Introduction.....	1
Présentation de l'entreprise.....	1
Contexte du stage.....	1
Objectif du stage.....	1
Rappels sémantiques.....	2
1. Matériel et méthodes de production des modèles numériques	4
1.1. Données.....	4
1.2. Logiciels	4
1.3. Méthode	5
2. Résultats	14
2.1. MNS produits.....	14
2.2. MNT produits.....	14
2.3. MNH produits	14
3. Analyse et discussion.....	17
3.1. Interprétation des résultats.....	17
3.2. Test de la qualité des MNS produits.....	18
3.3. Test de la qualité des MNT produits.....	25
3.4. Test de la qualité des MNH produits	29
3.5. Validation des résultats / Test sur le Brésil	34
Conclusion et perspectives.....	37
Conclusion sur les résultats	37
Perspectives.....	37
Bibliographie.....	39

Table des figures

Figure 1 : Présentation du site d'étude : l'île de Mayotte (source : Google Maps).....	2
Figure 2 : Différence entre le MNS, le MNT et le MNH	3
Figure 3 : Principe de la tri-stéréoscopie.....	3
Figure 4 : Illustration de l'opération d'interpolation selon les distances pondérées.....	6
Figure 5 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous Erdas.....	7
Figure 6 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous ENVI.....	8
Figure 7 : Chaîne de travail du pipeline ASP	9
Figure 8 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous PCI	10
Figure 9 : Fonctionnement de l'algorithme DSM2DTM de PCI	11
Figure 10 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNT sous PCI.....	11
Figure 11 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNH	11
Figure 12 : Illustration de l'« effet de seuil » sur le MNH issu du MNS ASP et du MNT SRTM à 90 mètres ...	15
Figure 13 : Schéma explicatif de l'« effet de seuil »	15
Figure 14 : Illustration de l'« effet de seuil » sur le MNH issu du MNS ASP et du MNT SRTM ré-échantillonné à 5 mètres.....	16
Figure 15 : Guide à l'interprétation des tests de qualités globaux pour les MNH	17
Figure 16: Comparaison entre les MNS créés et le MNS LiDAR sur des points particuliers/ Zone test de 4 km²	18
Figure 17: Comparaison entre les MNS créés et le MNS LiDAR sur des points particuliers / Intégralité de la zone d'étude.....	20
Figure 18 : Comparaison entre les MNT créés et le MNT LiDAR sur des points particuliers.....	25
Figure 19 : Comparaison entre les MNH créés et le MNH LiDAR sur des points particuliers	29
Figure 20 : Représentation de la différence de traitement des zones densément boisées entre les MNH issus des MNT PCI et ceux issus du MNT SRTM	31
Figure 22 : Comparaison entre hauteurs moyennes calculées et hauteurs moyennes relevées au Brésil.....	35

Table des tableaux

Tableau 1 : Paramétrage du capteur et de la projection pour le test sur Mayotte	5
Tableau 2 : Statistiques des différences entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Zone test de 4 km ²	22
Tableau 3 : Statistiques des différences entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Intégralité de la zone d'étude.....	23
Tableau 4 : Statistiques des différences entre les MNT produits et le MNT LiDAR	27
Tableau 5 : Statistiques des différences entre les MNH produits et le MNH LiDAR	31
Tableau 6 : Représentation de l' « effet de détermination » des moyennes et des écart-types selon les MNS et MNT utilisés.....	33
Tableau 7 : Statistiques des différences entre les hauteurs moyennes calculées et les hauteurs moyennes relevées	36

Introduction

Présentation de l'entreprise

Ce stage a été réalisé au sein de l'unité mixte de recherches TETIS, à la Maison de la Télédétection de Montpellier. Cette structure regroupe des équipes de recherches de différents centres et instituts pour constituer un pôle de recherche appliquée en télédétection et information géographique.

Les activités des unités de la maison de la télédétection s'organisent autour de trois axes :

- Compétences méthodologiques et thématiques
- Activités de recherche à travers des projets, thèses et publications
- Formations de haut niveau dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection.

Ces activités sont structurées autour de produits issus du traitement de données et d'informations spatialisées. Le cadre général est celui de l'aide à la gestion de l'environnement, des ressources et des territoires.



Contexte du stage

Ce stage s'intègre dans le projet intitulé « THRS-3D : Utilisation d'images Pléiades tri-stéréoscopiques pour la caractérisation de paysages complexes en milieu Tropical », financé par le Programme National de Télédétection Spatiale en 2014 et 2015 et coordonné par Stéphane Dupuy. Ce projet fait suite à une cartographie des espaces boisés de Mayotte conduite par les unités TETIS et UPR BSEF du CIRAD entre 2008 et 2012; il a notamment bénéficié du soutien du CNES dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs de la constellation de satellites Pléiades. Le présent stage a en outre été financé par le projet Geosud, avec une convention IRSTEA, sur une durée de 6 mois (3mars- 29 aout 2014).

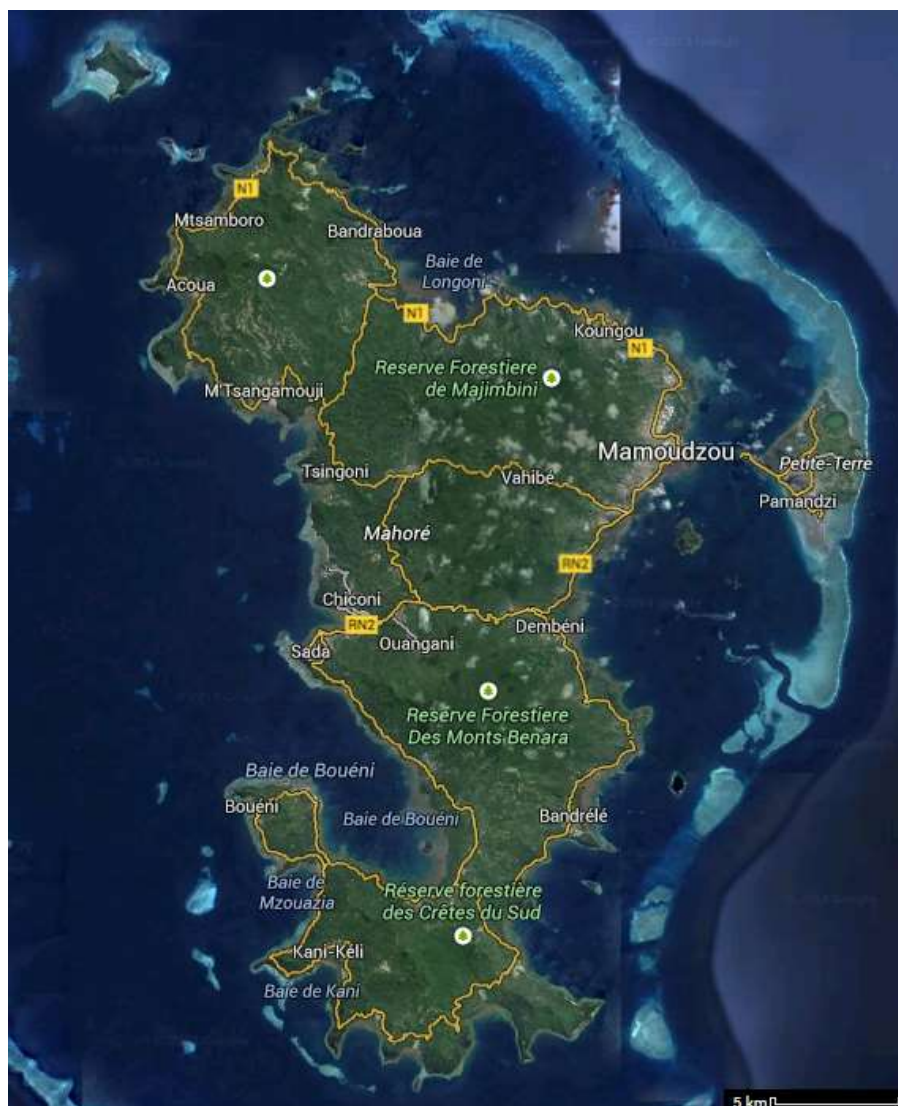
Objectif du stage

Cette étude fait suite à une première cartographie de l'île de Mayotte (Dupuy et al. 2013 ; Lainé et al. 2010), qui avait permis d'obtenir les caractéristiques de la structure horizontale des zones forestières de l'île grâce à un MNS et un MNT générés à partir de données LiDAR. A partir de ces données, un Modèle Numérique de Canopée avait été généré, permettant de compléter l'imagerie aérienne afin de produire la première carte de végétation de Mayotte mettant plus l'accent sur la structure que la composition (cf. Dupuy et al. 2012).

L'idée majeure du nouveau projet, est de conduire une étude similaire mais basée cette fois sur des données tri-stéréoscopiques Pléiades, au coût relativement abordable, et le MNT SRTM disponible gratuitement. En effet, la disponibilité de données LiDAR sur une zone d'étude donnée est à la fois très rare et très onéreuse, ce qui rend la méthodologie appliquée à Mayotte difficilement extrapolable à d'autres zones tropicales. Cette étude devra aussi permettre d'étudier la potentialité de cette nouvelle technologie.

La mission spécifique au présent stage est donc la mise au point d'une méthode reproductible (réutilisable sur un autre terrain d'étude) de création d'un Modèle Numérique de Surface à partir d'une acquisition tri-stéréoscopique Pléiades. Ce MNS doit être suffisamment fiable et précis pour permettre l'identification et la classification des espaces boisés et agro-forestiers de Mayotte en nous basant sur leur hauteur et leur hétérogénéité horizontale.

Figure 1 : Présentation du site d'étude : l'île de Mayotte (source : Google Maps)



Rappels sémantiques

Que sont les Modèles Numériques ?

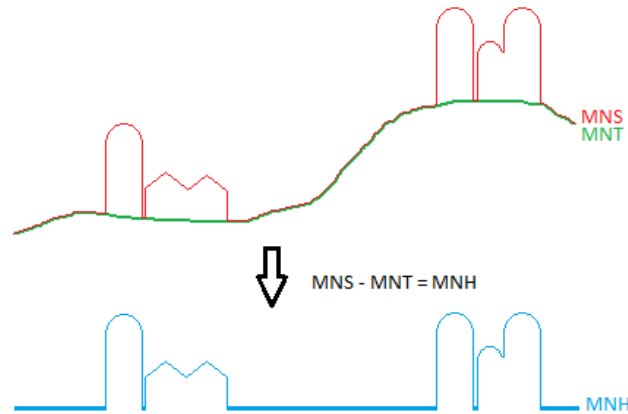
Il existe de nombreuses définitions des termes MNS, MNT, MNH et de leurs équivalents anglais. Afin de ne laisser aucune ambiguïté, les termes employés dans cette étude seront basés sur les définitions qu'en donne l'ouvrage « Cartographie thématique 4 : Des transformations renouvelées » de Cauvin et al. (2008). On retiendra donc que le MNT est « un modèle raster, donc avec des valeurs régulièrement espacées selon un mode maillé. C'est dans ce dernier sens que le MNT est le plus souvent utilisé ainsi que le montre bien la définition du CERTU : « un MNT est un semis de points réguliers, représenté par une matrice (grille) de n lignes et p colonnes ($n \times p$ points). Chaque valeur de nœud est l'altitude $[Z]$ à ce nœud. Chaque nœud est donc un objet vectoriel élémentaire, représenté par un point ».

Le MNT représente donc la topographie de la surface terrestre. Le MNS, lui, est la surface numérique qui représente l'altitude de tout ce qui se trouve au-dessus de la surface topographique (bâti, végétation, etc.). Enfin, la différence entre le MNT et le MNS conserve les informations sur l'ensemble des objets qui se trouvent au-dessus de la surface topographique, donc la hauteur des bâtiments d'une ville peut être déterminée pour chaque point $[X,Y]$. La différence entre son altitude dans le MNS et celle dans le MNT définit le MNH.

Au cours de cette étude les termes seront donc définis ainsi :

- **Modèle Numérique:** modèle raster constitué de valeurs régulièrement espacées selon un mode maillé.
- **Modèle Numérique de Surface (MNS) :** Représentation de l'altitude du sol plus celle du sursol (=tout ce qui se trouve au-dessus de la surface topographique (bâti, végétation, etc.)).
- **Modèle Numérique de Terrain (MNT) :** Représentation de la topographie de l'espace terrestre.
- **Modèle Numérique de Hauteur (MNH) :** Différence entre le MNT et le MNS. Il représente uniquement les objets du sursol.

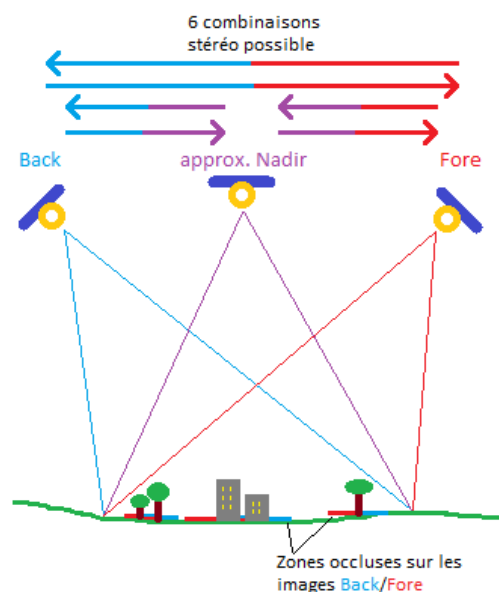
Figure 2 : Différence entre le MNS, le MNT et le MNH



Principe de la multi-stéréoscopie

La stéréoscopie est une technique permettant d'estimer des distances par rapport à la déformation des éléments d'une image sur l'autre. Ce principe ne se limite pas forcément à 2 images, comme l'atteste C. Guérin (2014) : « Les satellites tels que Pléiades permettent l'acquisition d'images en n-uplet stéréoscopiques avec n compris entre 2 et 25. Chaque image est alors acquise avec un angle d'incidence et d'azimut différent. Dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte tout ou partie des images produites pour le calcul d'un MNS. ». Dans notre cas, notre étude se base sur 3 images donc sur le principe de la tri-stéréoscopie.

Figure 3 : Principe de la tri-stéréoscopie



D'autres rappels sémantiques complémentaires sont donnés en Annexe 1, comme la définition du rapport B/H ou la référence altimétrique.

1. Matériel et méthodes de production des modèles numériques

1.1. Données

Les données utilisées durant ce stage sont très variées et disparates. Elles sont listées en Annexe 2 avec des informations sur leur origine et les coûts afférents. Elles regroupent des données d'imagerie satellitaires et aéroportées, en mono-acquisition ou en stéréoscopie, des données issues de mesures LiDAR, ou encore des mesures effectuées sur le terrain. Elles se focalisent sur deux sites d'étude : l'île de Mayotte, d'une part, et la région d'Itatinga au Brésil, d'autre part.

Ces données ont des résolutions spatiales différentes : 1 mètre pour les données LiDAR ; 0,5 mètres pour les images Pléiades panchromatiques et 90 mètres pour le MNT SRTM. Cela a par la suite compliqué les comparaisons entre les produits générés surtout lorsque les comparaisons s'effectuent avec le MNT SRTM. Afin de faciliter ses comparaisons, le MNT SRTM a été artificiellement ré-échantillonné à 5 mètres.

Les données Pléiades et LiDAR n'ayant pas été acquises la même année (respectivement 2013 et 2008), cela peut créer des ambiguïtés lors des comparaisons entre les produits issus du couple tri-stéréoscopique Pléiades et ceux issus des données LiDAR.

1.2. Logiciels

Erdas Imagine

Erdas Imagine est un logiciel commercial de télédétection commercialisé par Hexagon Geospatial. Sa toute première version « ERDAS 4 » date de 1978. Le logiciel « Erdas Imagine » tel qu'il est connu maintenant a vu le jour en 1991. La version utilisée ici est la 2013, sous licence IRSTEA. L'outil utilisé pendant ce stage est le module de photogrammétrie LPS.

ASP

ASP est un outil open-source conçu pour automatiser le traitement d'images stéréo capturées par des capteurs orbitaux (sondes, appareils commerciaux) ou par des robots d'exploration (rovers), développé par le « Ames Research Center » de la NASA. Il permet de générer des produits cartographiques comme des MNS, des ortho-images, ou des modèles 3D et fait partie du toolkit « NASA NeoGeography Toolkit » de reconstruction 3D pour de l'exploration planétaire. La dernière version d'ASP est la 2.3.0 (décembre 2013), dont il est possible de télécharger l'intégralité du code sur le site nasa.gov pour de l'utilisation multi-plateforme.

ENVI

ENVI est un logiciel commercial de traitement d'images et d'analyse géospatiale développé par Exelis. Il est adapté à l'utilisation des images panchromatiques, LiDAR, SAR, multispectrales et hyperspectrales. La version utilisée ici est la 5.1, sous licence IRSTEA. Toutefois, le module « DEM Wizard Extraction » spécifique à la création d'un MNS n'est pas inclus dans les licences de base et nous avons eu recours à une version d'évaluation gracieusement prêtée par Exelis-VIS pour tester pleinement ce logiciel.

PCI Geomatica

PCI Geomatica est un logiciel commercial de télédétection développé par la PCI Geomatics Inc.. Ce logiciel a la particularité de proposer une librairie d'algorithmes, dont « DSM2DTM » qui permet de dériver un MNT d'un MNS. Les opérations ont été réalisées sur la dernière version Geomatics 2013 sous licence d'évaluation fonctionnelle pendant 15 jours.

MicMac

MicMac est un logiciel open-source développé par l'IGN, permettant la mise en correspondance automatique d'images dans un contexte géographique. Il peut être très utile pour la production de MNS à partir d'images aéroportées. Malheureusement une opération en amont de spatiotriangulation est

nécessaire pour permettre l'utilisation de données satellites (telles que Pléiades), réalisée par un logiciel interne à l'IGN nommé GeoView qui lui est commercial (Céline Puig, IGN, communication personnelle). Comme ce logiciel n'était pas disponible à la Maison de la Télédétection, il ne nous a pas été possible de tester MicMac durant la durée de ce stage.

1.3. Méthode

Orthorectification des images et création des points homologues

Dans chacun des logiciels expérimentés, la création de MNS intervient à la fin du processus d'orthorectification des images. Il est donc nécessaire, dans un premier temps d'intégrer les images Pléiades dans les outils adéquats en utilisant les métadonnées associées. Ces informations sont stockées dans un fichier au format RPC associé à l'image au format JPEG 2000.

La seconde étape consiste à sélectionner des Ground Control Points (GCP) sur les images Pléiades afin de les géoréférencer. Les logiciels utilisés proposent une interface permettant de placer les GCP à la fois sur les images Pléiades, sur une image de référence déjà orthorectifiée et sur un MNT. Cette opération permet de récupérer les coordonnées (X, Y, Z) de ce point homologue, qui sont par la suite associées aux GCP placés sur nos images. Ici, nos références sont :

- Pour Mayotte l'ortho-photographie acquise par IGN et le MNT SRTM
- Pour le Brésil l'image Pléiades au nadir géoréférencée et le MNT SRTM.

Une fois un nombre suffisant de GCP placés, il est nécessaire de définir des points homologues (appelés Tie-points) entre nos 3 images Pléiades. Nous avons choisi, afin de gagner du temps, de générer automatiquement les tie-points communs à au moins 2 images Pléiades, puis de les vérifier un par un afin de valider leur cohérence. Pour cette création de tie-points, Erdas et PCI sont plus faciles d'utilisation car ils permettent d'intégrer directement le MNT SRTM et l'orthophoto de référence dans l'interface du logiciel. En revanche, ENVI ne propose pas cette option ce qui nous oblige à récupérer manuellement les coordonnées des points homologues sur l'orthophoto ouverte sous un autre logiciel.

Tableau 1 : Paramétrage du capteur et de la projection pour le test sur Mayotte

Model Setup	Geometric Model Category	Rational Functions
	Geometric Model	Pléiades RPC
Projection	Horizontal	UTM WGS 84
	Horizontal Units	mètre
	Vertical	WGS 84

Principe de création d'un MNS

Corrélation des points

La génération d'un Modèle Numérique de Surface se base dans cette étude sur une méthode de stéréoscopie par corrélation. Cela consiste à mettre en correspondance des surfaces ayant des textures proches d'une image sur l'autre. (Devernay et Devade, 1999)

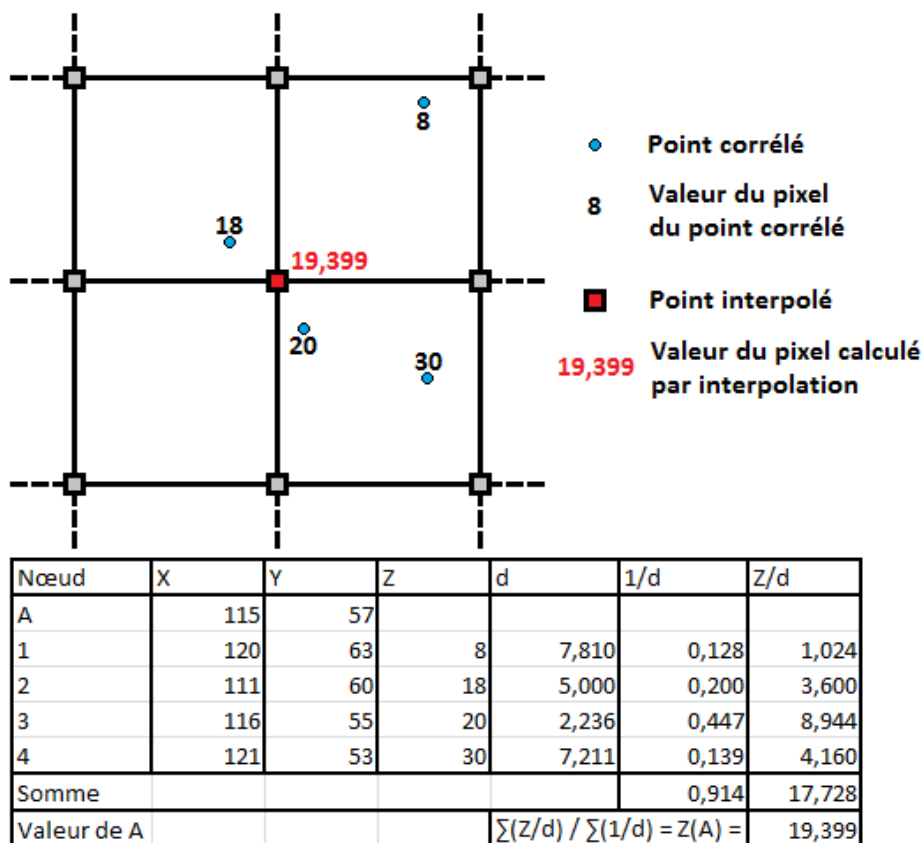
Deux points seront corrélés si les valeurs des pixels associés aux points à corréliser ainsi que les valeurs associées à leurs voisins sont similaires d'une image sur l'autre. Ce degré de similarité est appelé le « coefficient de corrélation ». Ce coefficient a pour valeur maximale 1 ce qui signifie dans ce cas que les valeurs associées aux points à corréliser et les valeurs de tous leurs voisins sont identiques d'une image sur l'autre.

En se basant sur la variation d'emplacement d'un point corrélé d'une image sur l'autre, les logiciels sont en mesure d'estimer l'altitude de ce point. A la fin de l'étape de corrélation on obtient des fichiers sous forme de nuage de point auxquels une valeur d'altitude est attribuée pour chacun de ces points corrélés.

Interpolation des points

L'interpolation permet de calculer les valeurs d'altitude de tous les points qui n'ont pas été corrélés. Elle se base sur un algorithme de distance pondérée : « La méthode de la distance pondérée s'applique après la construction d'une grille et repose sur le rôle des points en fonction de leur distance. Elle s'appuie sur un principe très intuitif, reconnu par de nombreuses disciplines et souligné par W. Tobler : « Les points les plus proches ont une plus grande influence que les points éloignés. » Les valeurs affectées aux points sont pondérées en fonction inverse de leur distance au nœud à valider, c'est à dire que leur influence décroît avec l'éloignement. » (Cauvin et al. 2008)

Figure 4 : Illustration de l'opération d'interpolation selon les distances pondérées



Fusion des MNS stéréoscopiques

Aucun des logiciels utilisés dans cette étude n'est en mesure de générer un MNS directement à partir des 3 images Pléiades. Dans tous les cas il est nécessaire dans un premier temps de générer un MNS par couple possible puis, dans un second temps, de fusionner les divers MNS stéréoscopiques résultant afin d'obtenir un MNS dit « tri-stéréoscopique ».

Erdas et PCI intègrent cette phase de fusion directement dans leur processus de génération du MNS, alors qu'ENVI et ASP ne se limitent qu'à la création de MNS stéréoscopiques qu'il faut ensuite fusionner manuellement. ENVI et ASP ne peuvent donc satisfaire seuls la création d'un MNS issu d'une tri-stéréoscopie.

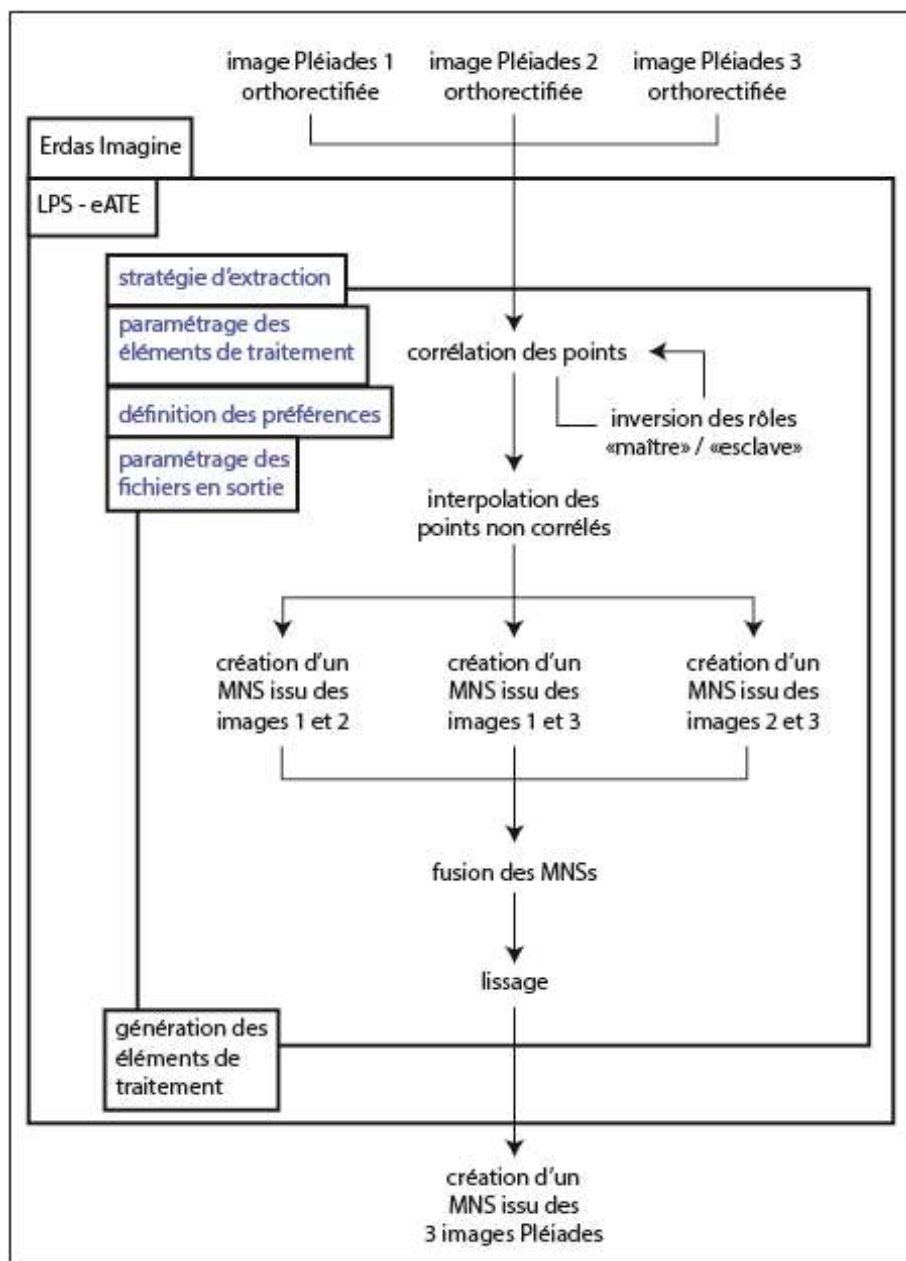
Chaînes de traitement adaptées à chaque logiciel

Erdas Imagine

Sous Erdas, le module eATE a été utilisé pour la création d'un MNS. Ce module est une des composantes de l'outil de photogrammétrie LPS proposé par ERDAS. EATE est une version avancée du module Classic ATE (Automatic Terrain Extraction). Il permet d'avoir un contrôle beaucoup plus approfondi des paramètres des opérations radiométriques. De plus, il traite une plus haute densité de points ce qui permet de générer des MNS à des résolutions beaucoup plus hautes. Dans notre cas, ce module est donc le plus approprié pour la création d'un MNS. La chaîne de traitement illustrant le fonctionnement de ce module eATE est décrite à la Figure 5. Les paramètres sélectionnés pour la création du MNS sont décrits en Annexe 4.

Concrètement, plusieurs MNS ont été produits en faisant varier différents paramètres afin d'en évaluer l'influence. Seuls deux MNS ont été retenus pour comparaison: l'un suivant les paramètres de base du logiciel et l'autre avec les paramètres ayant donné les meilleurs résultats sur un échantillon test. Les tableaux présentés en Annexe 4 regroupent les outils sélectionnés dans la stratégie d'extraction (tableau 3), le paramétrage des éléments de traitement (tableau 4), les préférences (tableau 5), et le paramétrage des fichiers de sortie (tableau 6).

Figure 5 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous Erdas

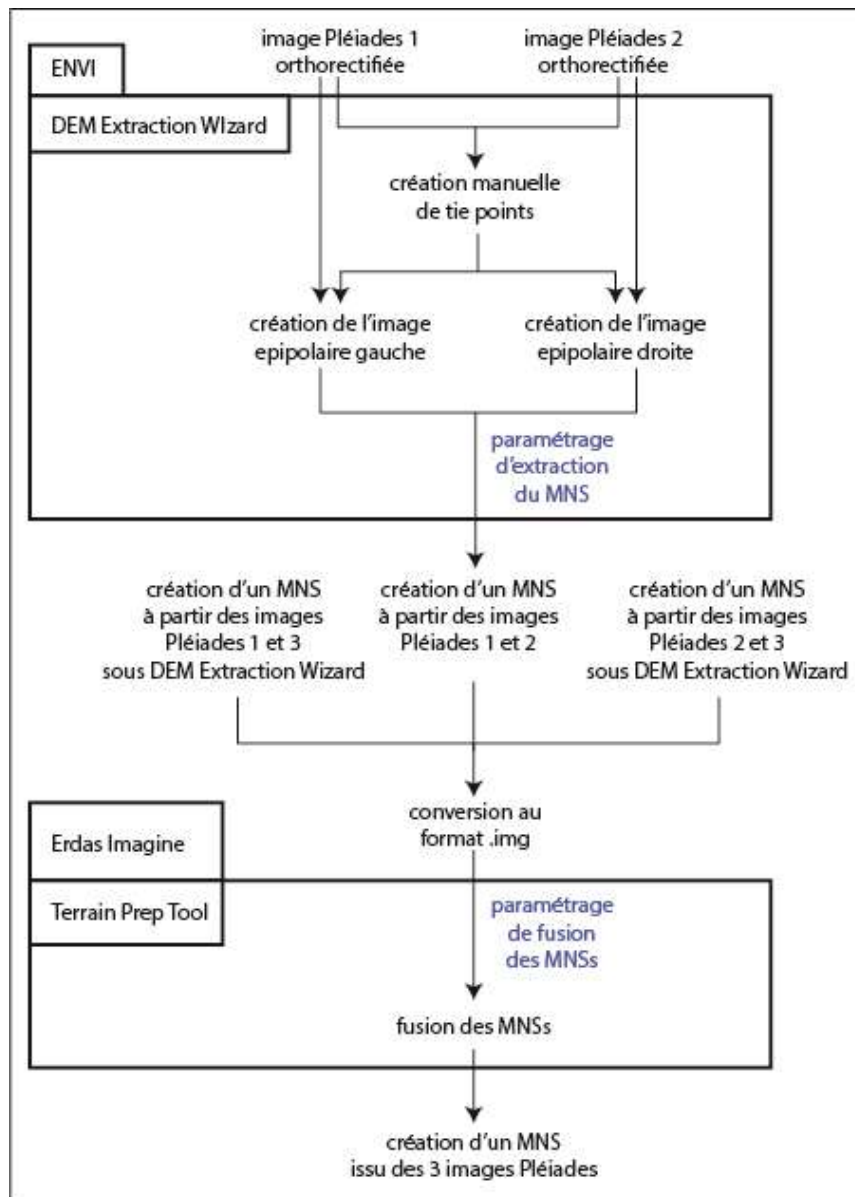


ENVI

L'opération de création d'un MNS sous ENVI a été réalisée à partir du module DEM Wizard Extraction, qui n'est pas en mesure de générer directement un MNS tri-stéréoscopique. Il est nécessaire de créer autant de MNS que de couples stéréo possibles. Pour différentes raisons techniques (cf. Annexes 3-ENVI) il n'a été possible de produire qu'une petite zone test de 4 km². La chaîne de traitement est décrite à la

Figure 6 et ses paramètres regroupés en Annexe 4 ; elle comprend donc une étape de création (Annexe 4, tableau 7) et de fusion (Annexe 4, tableau 8) des MNS.

Figure 6 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous ENVI

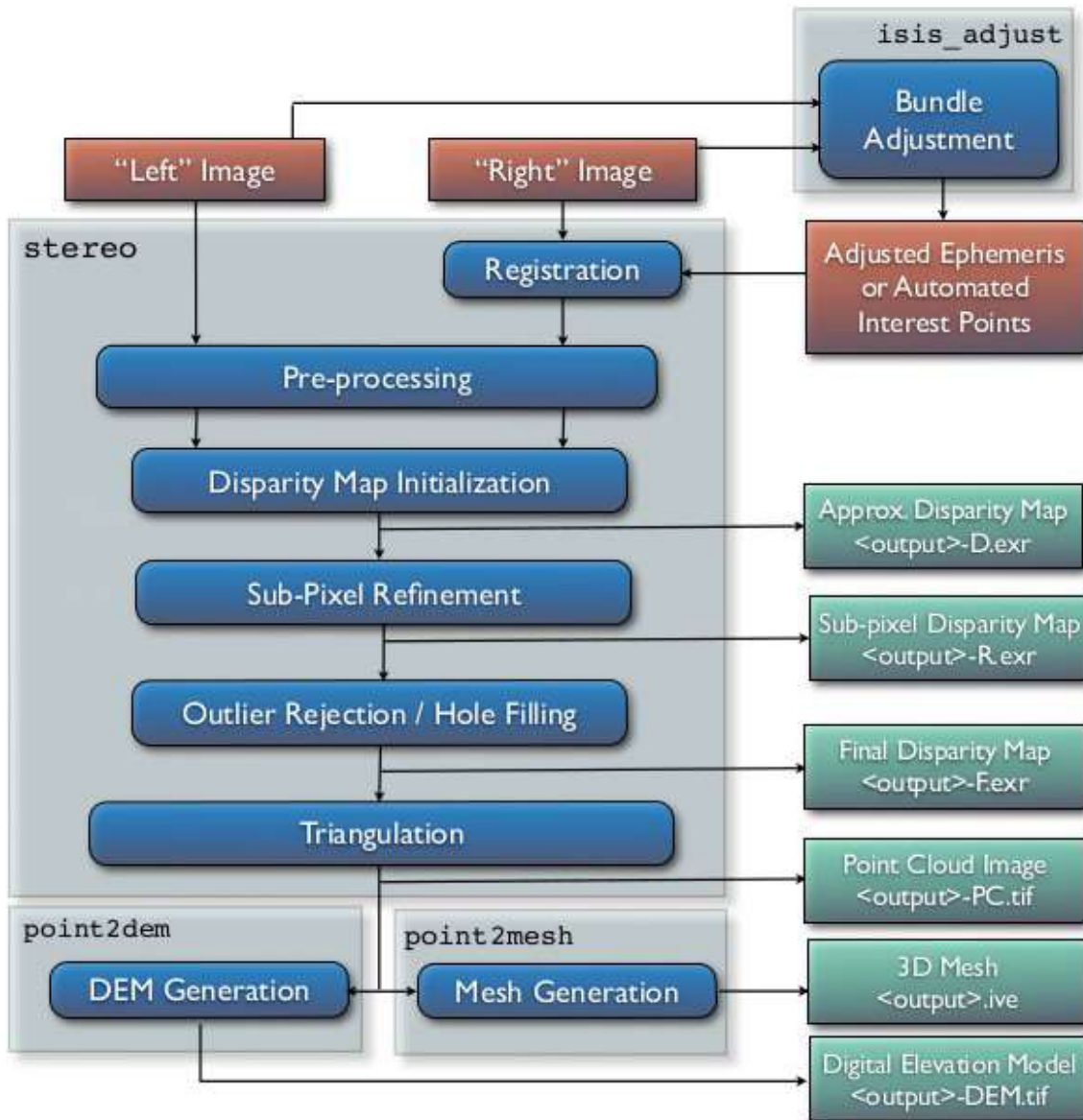


ASP

La création du MNS sous ASP a été réalisée en parallèle par Rémi Cresson (Cresson, 2014). La chaîne de traitement qu'il a mise en œuvre est décrite à la figure 7; elle comprend 6 étapes :

1. Alignement des images
2. Prétraitement des images (correction de la dynamique, filtrage, ...)
3. Calcul de la déformation (déterminé pour chaque pixel de l'image A à la position où il se retrouve dans l'image B)
4. Filtrage de la donnée de déformation par différents algorithmes
5. Triangulation (les coordonnées 3D sont calculées à partir du point 2D des images A et B,) et génération d'un nuage de points
6. Génération d'un MNS à partir du nuage de point et des RPCs

Figure 7 : Chaîne de travail du pipeline ASP



Les paramètres choisis (cf. tableau 9 de l'Annexe 4) n'ont pas été particulièrement testés : ils sont basés sur la documentation d'ASP comme censés donner les meilleurs résultats possibles.

- pré-alignement pour accélérer le processus de corrélation.
- filtre de prétraitement Laplacien de gaussienne pour réduire le bruit sur les images, plus rehaussement de contours.
- fonction de corrélation comme fonction de coût pour l'analyse de la déformation, car c'est la métrique la plus robuste et couramment utilisée en traitement du signal.
- fenêtre adaptative pour le filtrage de la carte de déformation pour permettre un affinage subpixelaire en restant peu sensible au bruit.

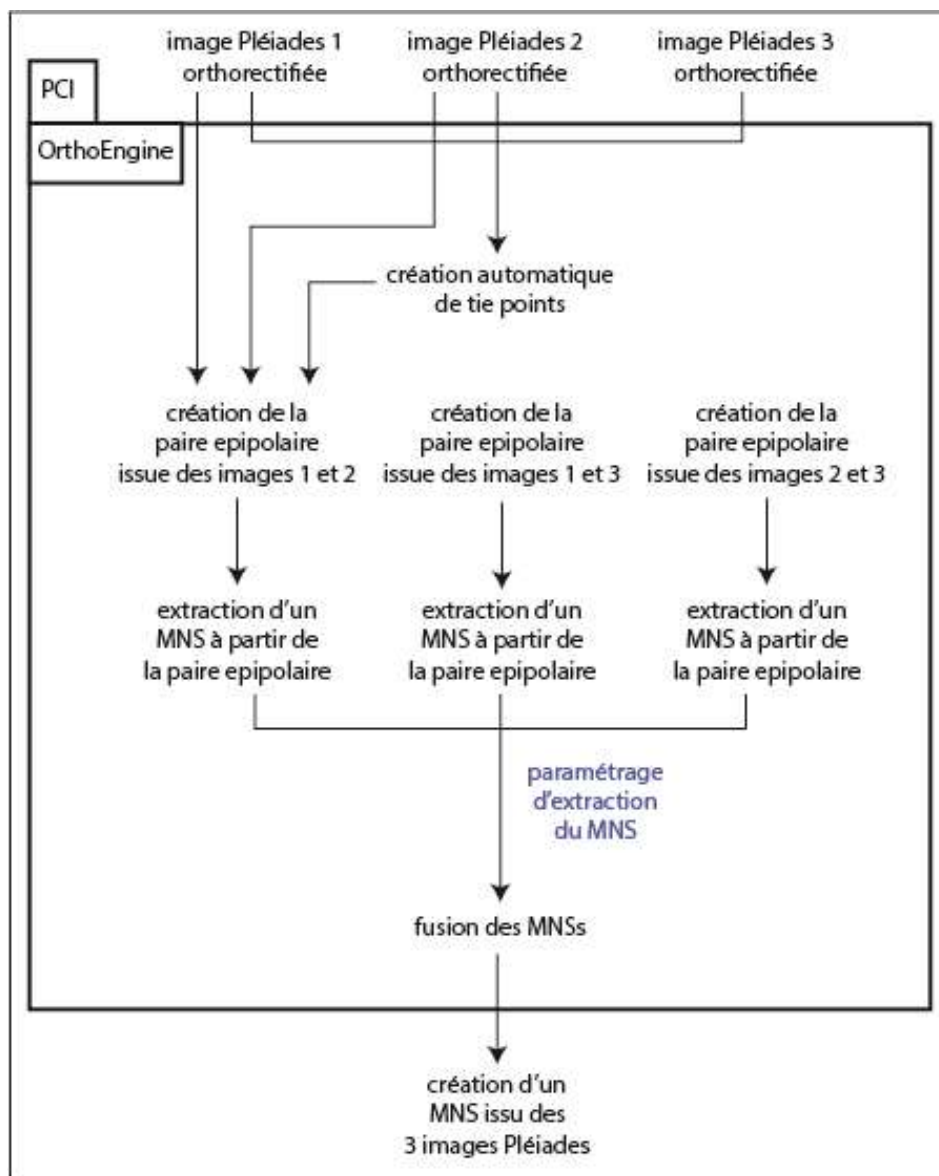
Il faut noter que le pipeline ASP est entièrement automatisé et comporte donc des étapes dont on ne peut pas évaluer la contribution (ex: reconstruction d'image dans les « trous », filtrage automatique des points aberrants,...). L'étape finale de génération de MNS prend en compte le nombre de points triangulés pour calculer une taille de pixel de façon à ce qu'en moyenne, il y ait 1 point par pixel dans le raster MNS mais cette densité peut être choisie différemment, ce qui pourrait faire l'objet de tests plus approfondis.

Un MNS par couple stéréoscopique a donc été créé sous ASP, puis les 3 MNS ont été fusionnés sous l'outil Terrain Prep Tool d'Erda.

PCI Geomatics

La génération de MNS sous PCI se réalise grâce au module OrthoEngine. La chaîne de traitement est décrite à la Figure 8 et les paramètres sélectionnés pour la création du MNS regroupés au tableau 10 de l'Annexe 4. 2 MNS distincts ont été générés à partir de PCI : l'un selon les paramètres de base du logiciel et l'autre avec des paramètres nécessitant plus de temps de travail mais permettant d'avoir un résultat de meilleure qualité.

Figure 8 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNS tri-stéréoscopique sous PCI



Création d'un MNT

Sur l'ensemble des logiciels utilisés dans cette étude, seul PCI permet de dériver un Modèle Numérique de Terrain à partir d'un Modèle Numérique de Surface, avec l'algorithme « DSM2DTM ». Le principe (cf. Figure 9) repose sur l'identification de la valeur minimale contenue dans une fenêtre de dimension définie, qui est alors assimilée à l'altitude du sol nu. Puis la fonction « retire » du MNS les éléments du sursol pour produire un MNT représentant le sol nu. La taille de cette fenêtre doit être assez large pour permettre de trouver au moins une valeur de pixel qui appartienne réellement au sol nu sur le MNS (à l'opposé des autres pixels qui représenteront eux le sursol). Les paramètres sélectionnés pour cette opération sont regroupés au tableau 11 de l'Annexe 4. Pour des raisons de conservation de format natif, seul le MNS créé sous PCI a été utilisé pour la génération d'un MNT.

Figure 9 : Fonctionnement de l'algorithme DSM2DTM de PCI

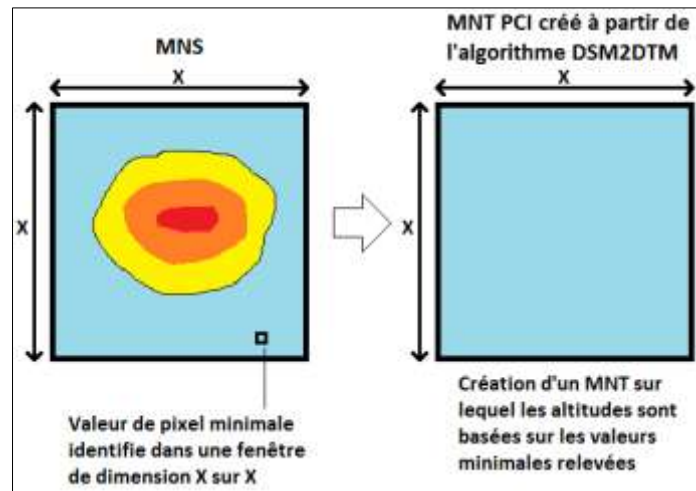
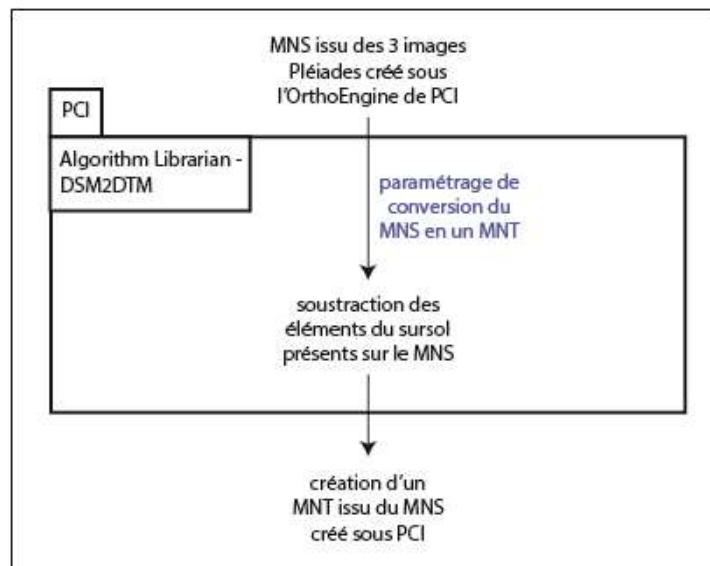


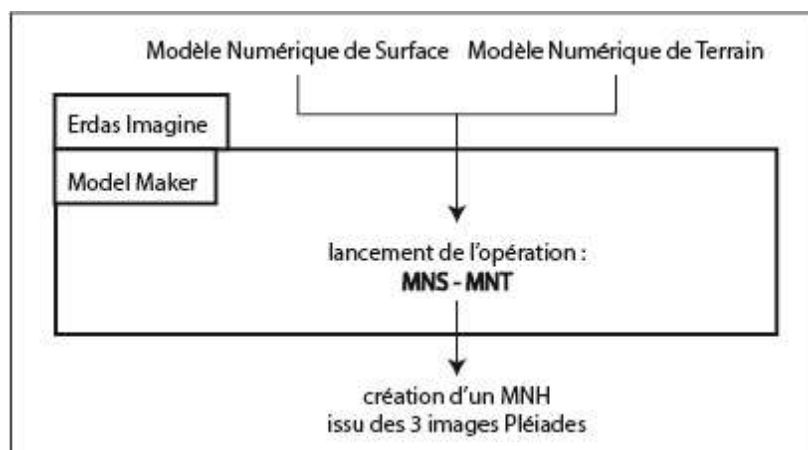
Figure 10 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNT sous PCI



Création d'un MNH

La création d'un MNH consiste simplement à soustraire à un Modèle Numérique de Surface, un Modèle Numérique de Terrain. Elle a été opérée sous Erdas (cf. Figure 11).

Figure 11 : Chaîne de traitement pour la création d'un MNH



Test de la qualité du résultat par rapport aux produits LiDAR de référence

La seule production de Modèles Numériques n'est pas la finalité de cette étude: il faut aussi juger de leur qualité en les comparant à une référence fiable. Notre étude portant sur l'identification d'une solution pouvant remplacer les données LiDAR, il est logique de considérer les Modèles Numériques LiDAR comme la qualité de rendu à atteindre. De plus, dans notre cas nous cherchons à produire un Modèle Numérique permettant de visualiser la hauteur du couvert végétal mais aussi de distinguer les différents types de couverts. Il est donc nécessaire que les MNH produits aient une résolution suffisante pour accorder un nombre de pixels minimum à chaque arbre. Il doit aussi permettre de distinguer si la texture de la canopée est homogène ou hétérogène, ce qui inclut que ce MNH doit représenter les variations soudaines de hauteur. C'est donc sur la précision géométrique du MNH que nous devons jouer, c'est-à-dire la composante principale de l'information qualitative du Modèle Numérique, qui décrit le décalage quantitatif entre la surface du terrain et celle décrite par le modèle (Ettarid et al. 2004). Ces qualités recherchées étant présentes dans les Modèles Numériques LiDAR, il est d'autant plus logique de considérer ce dernier comme notre référence.

Cependant, rappelons que ce MNS a été obtenu avec une technologie bien différente de nos images Pléiades, et qu'on pourra se rapprocher de cette qualité sans pour autant l'atteindre. De plus, les images tri-stéréoscopiques utilisées ici datent de 2013 alors que le MNS LiDAR date de 2008. La zone d'étude et tout particulièrement la végétation, a pu changer dans cet intervalle de temps, impliquant un facteur naturel de variation qu'il sera difficile d'évaluer et de quantifier ici.

L'estimation de la qualité des Modèles Numériques (MNS/MNT/MNH) se base sur deux tests distincts : l'un à partir de points individuels, ce qui permet en outre d'estimer la qualité de relevés sur des objets bien identifiés (sol, canopée, bâti) et l'autre plus global sur l'ensemble de la zone, qui ne fait pas de distinction sur les objets mais permet d'avoir une estimation générale et plus exhaustive de la qualité du produit.

Test ponctuel

Ce premier test se base sur la comparaison des valeurs altimétriques (ou de hauteur pour le MNH) relevées sur des points homologues entre le produit LiDAR et le produit comparé. Afin de pouvoir estimer la qualité des résultats obtenus sur le logiciel ENVI avec les autres MNS créés tout en ne nous limitant pas à un échantillon test de 4 km², deux relevés ponctuels sont effectués. Un premier sur une zone test de 4 km² (zone correspondant au seul MNS produit sous ENVI). Un second sur l'ensemble de la zone d'étude (qui lui exclut le Modèle Numérique généré à partir d'ENVI).

Les points sont répartis équitablement sur la zone test et sur la zone d'étude intégrale, et distribués selon les 3 catégories d'éléments : sol, canopée et bâti afin de vérifier le comportement des différents produits selon le type d'élément du terrain. Sur l'échantillon test de 4 km² correspondant aux limites du MNS créé sous ENVI, 25 points sont relevés, dont 9 pour le sol, 9 pour la canopée et 7 pour le bâti (cf. répartition des points donnée en figure 3 de l'Annexe 5). Pour la zone d'étude complète, 45 points sont relevés, avec 15 points par type d'élément (cf. stratification donnée en figure 4 de l'Annexe 5).

Les coordonnées en Z de ces points sont enregistrées dans un tableau, puis la différence entre le Modèle Numérique comparé et le Modèle Numérique LiDAR est calculée. On récupère des statistiques de cette différence telles que la moyenne, l'écart-type, le coefficient de corrélation et le coefficient de détermination, en séparant ou non l'ensemble de ces points selon leur nature.

Moyenne : permet d'estimer le décalage existant entre les altitudes (hauteurs) calculées (valeurs en Z) et le référentiel.

Ecart-type : estime la dispersion générale des différences en Z calculées. Permet de déterminer si les écarts à la référence sont homogènes ou hétérogènes.

Coefficient de corrélation : issu du croisement des valeurs en Z du Modèle Numérique LiDAR avec les valeurs en Z du Modèle Numérique créé, estime l'intensité de la liaison existant entre les variables en entrée.

Coefficient de détermination : issu du croisement des valeurs en Z du Modèle Numérique LiDAR avec les valeurs en Z du Modèle Numérique créé, indique combien les points (les Z du Modèle Numérique créé) suivent un modèle statistique (les Z du Modèle Numérique LiDAR).

Pour les MNS et les MNT, les résultats des coefficients de corrélation et de détermination seront toujours très proches de 1. Même si des écarts d'altitude existent, ils ne sont que de quelques mètres ce qui est insignifiant par rapport aux valeurs en elles-mêmes. Cette statistique est déjà plus parlante pour les MNH.

Un graphe par catégorie de point représente alors les écarts d'altitudes ou de hauteur existants entre le Modèle Numérique comparé et le Modèle Numérique LiDAR.

Test global

Le second test se base sur la comparaison entre la totalité des pixels d'un Modèle Numérique créé à ceux du Modèle Numérique LiDAR correspondant. En réalité, ce test n'inclut pas 100% des pixels mais plutôt ceux inclus dans un masque, requis afin d'éliminer la présence de l'océan, de la couverture nuageuse et des bordures des produits (victimes d'artefacts) afin d'écarter les valeurs aberrantes de cette comparaison.

Concrètement, cette comparaison se base sur la soustraction du Modèle Numérique créé par le Modèle Numérique LiDAR (opération réalisée avec Erdas Imagine). Le fichier raster résultant est ensuite ouvert sous ArcGIS afin d'avoir une représentation graphique de cette différence. C'est aussi sous ce logiciel que le masque est appliqué sur le raster de différence. On récupère par la suite des statistiques de ce raster telles que la moyenne et l'écart-type.

Validation : test sur les parcelles au Brésil

Production du MNS

Guerric Le Maire, chercheur au CIRAD, à l'UMR Eco&Sols, travaille sur la cartographie de la plantation d'essais clonaux d'eucalyptus dans la région d'Itatinga au Brésil (Le Maire et al. 2014). L'un des éléments de l'étude est la distinction des hauteurs moyennes des individus dans des parcelles tests. Nous avons donc réalisé un travail en commun, lui permettant de faire avancer ses travaux et de vérifier la validité des conclusions de cette étude sur l'île de Mayotte. Lors de cette mission parallèle, les opérations de création de MNS ayant donné les meilleurs résultats sous Erdas et PCI ont été répétées sur une acquisition tri-stéréoscopique couvrant la zone où sont plantés les échantillons tests d'eucalyptus. Cependant, sous PCI le paramétrage « Terrain type » a été changé en « Hilly » au lieu de « Mountainous » afin de mieux correspondre au relief de l'Itatinga.

Les résultats sous Erdas ont été obtenus de deux manières différentes. Dans un premier temps, les hauteurs calculées sous Erdas ont été obtenues à partir du nuage de points représentant l'ensemble des points corrélés. Ce nuage a été croisé avec les shapefiles correspondant aux délimitations des répétitions clonales afin d'extraire un nuage de point par clone. C'est sur ces portions de nuage que les hauteurs calculées ont été extraites. Dans un second temps, les hauteurs moyennes ont été relevées sur le raster MNS obtenu sous Erdas. De ce fait ce MNS ne se contente pas de représenter les points corrélés puisqu'il inclut aussi les points interpolés. Les moyennes des hauteurs ont été extraites pour chaque essai clonal sous ArcGIS grâce à l'outil « Zonal Attribut ».

Concernant PCI, les résultats obtenus sont basés sur le raster MNS produit (de la même manière que la seconde solution pour Erdas).

Ces hauteurs calculées seront comparées à des hauteurs relevées sur le terrain et servant de référence (le diamètre de chaque eucalyptus a été mesuré, puis une relation allométrique entre diamètre et hauteur a été appliquée afin d'en estimer la hauteur).

2. Résultats

2.1. MNS produits

Au final, un ensemble de six MNS ont été produits:

- 2 MNS avec le logiciel Erdas représentant l'intégralité de la zone d'étude (le premier réalisé avec les paramètres de base de l'opération eATE et le second avec un paramétrage ayant donné de meilleurs résultats sur une zone test)
- 1 MNS avec le logiciel ENVI représentant une zone de 4 km².
- 1 MNS avec le logiciel ASP représentant l'intégralité de la zone d'étude.
- 2 MNS avec le logiciel PCI représentant l'intégralité de la zone d'étude (le premier a été réalisé avec un paramétrage de base alors que le second est basé sur des paramètres plus avancés ayant grandement augmenté le temps de production)

Ces différents produits sont présentés à l'Annexe 6 (figures 5 et 6)

Remarquons que, les données LiDAR sont des valeurs orthométriques (c'est-à-dire calées sur le niveau moyen de la mer), alors que les MNS produits sous ASP et PCI sont calés sur l'ellipsoïde. Il a fallu convertir les données de ces derniers pour rendre l'ensemble des produits cohérents entre eux. Pour passer de la hauteur ellipsoïdale à la hauteur orthométrique, l'ondulation du géoïde a été soustraite en utilisant le modèle EGM 2008 (Earth Gravitational Model), distribué par la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) (cf. Cresson, 2014 et Annexe 1 : références altimétriques).

2.2. MNT produits

Comme évoqué précédemment, les MNT produits sont tous issus du meilleur MNS produit sous PCI, à savoir le MNS calculé avec les paramètres avancés. Six MNT ont ainsi été produits, correspondant chacun à une taille de fenêtre différente. Ils sont présentés en Annexe 6 (figures 7 et 8).

2.3. MNH produits

L'un des objectifs de ce stage est la création d'un MNH en nous basant uniquement sur nos images Pléiades et le MNT SRTM, ce qui est effectué par soustraction d'un des MNS créés à partir du trio d'images Pléiades par le MNT SRTM. Cette procédure a été appliquée seulement aux 3 meilleurs MNS produits :

- le MNS créé sous Erdas avec les paramètres avancés
- le MNS créé sous ASP
- le MNS créé sous PCI avec les paramètres avancés.

Ces MNH produits à partir du MNT SRTM présentent un aspect en damier (cf. Figure 12), avec des coupures brutales des objets, que nous appellerons ici « effet de seuil ». Ceci est dû à la différence de taille de cellule entre le MNS utilisé (de 0,5 à 1 mètre) et le MNT SRTM (90 mètres) dans lequel on peut observer des ruptures abruptes (écarts importants de valeurs) d'une cellule à la cellule voisine. Le MNH, issu de la soustraction du MNS par le MNT SRTM, subira donc des variations soudaines artificielles en bordure des cellules du MNT SRTM (cf. Figure 13). La solution pour faire disparaître cet « effet de seuil » serait d'avoir un MNT qui, au même titre que le MNS utilisé, possède des variations d'altitude progressives, donc si possible avec des cellules d'une taille comparable au MNS en entrée. Pour tenter de le réduire dans le cas présent, le MNT SRTM a été ré-échantillonné à 5 mètres avec un algorithme « cubic convolution » : l'effet de seuil est alors atténué, mais toujours existant (cf. Figure 14).

Figure 12 : Illustration de l'« effet de seuil » sur le MNH issu du MNS ASP et du MNT SRTM à 90 mètres

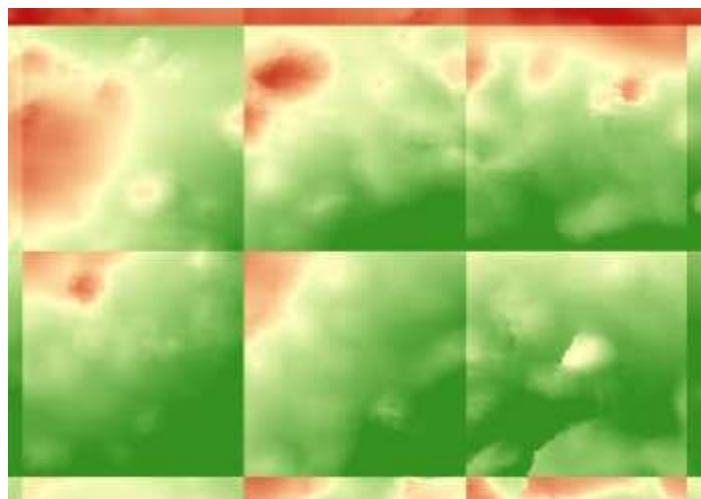


Figure 13 : Schéma explicatif de l'« effet de seuil »

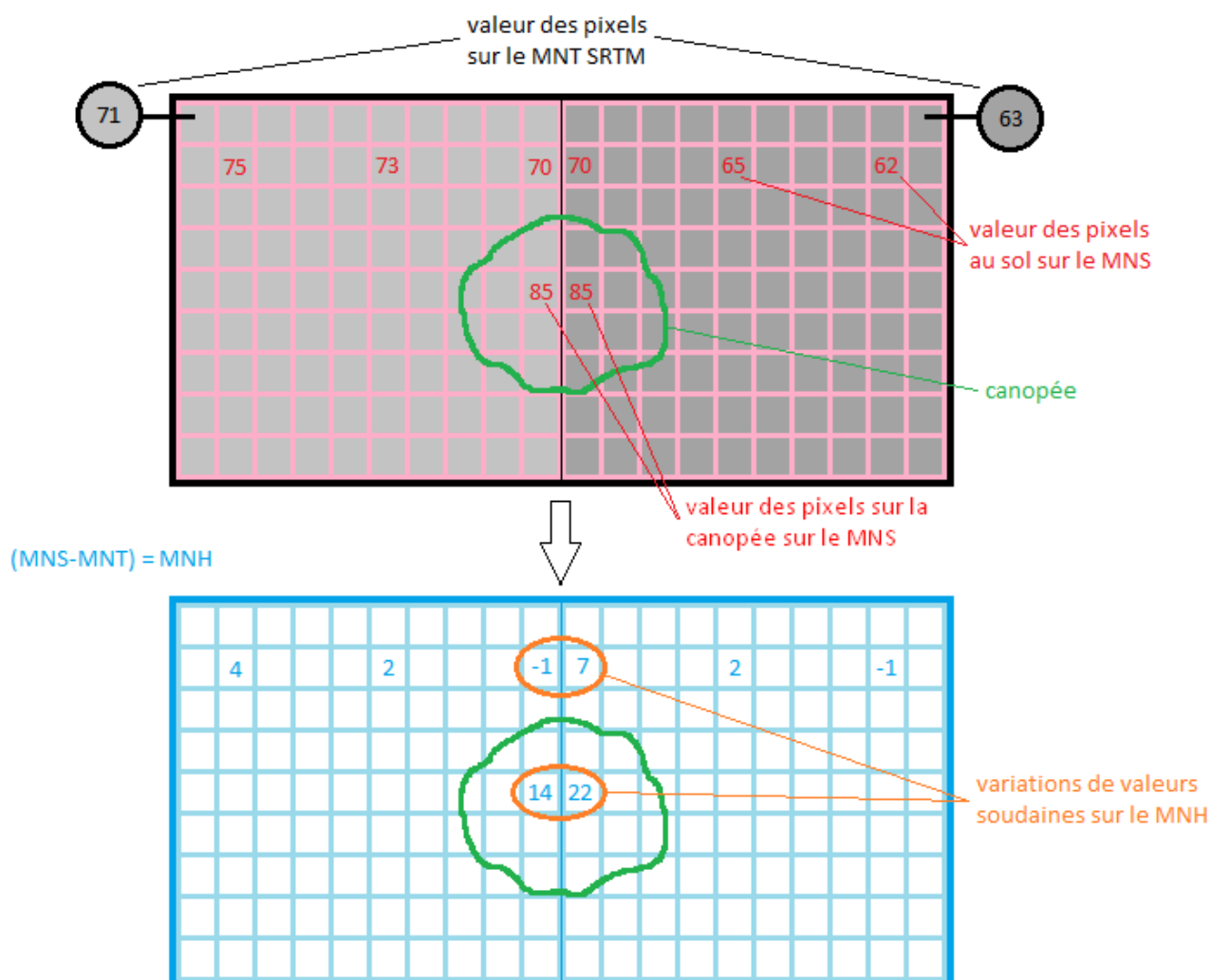
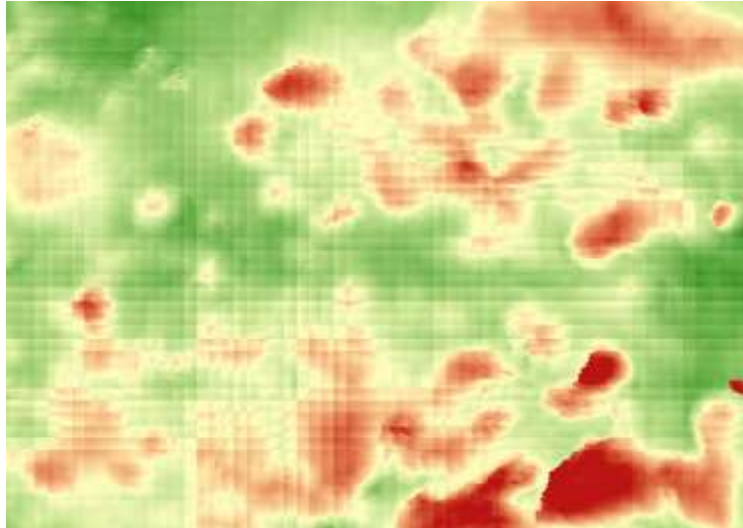


Figure 14 : Illustration de l'« effet de seuil » sur le MNH issu du MNS ASP et du MNT SRTM ré-échantillonné à 5 mètres



Les MNT produits sous PCI possèdent la même résolution que les MNS dont ils sont dérivés, ce qui permet de créer un MNH dont les 2 origines partagent la même résolution. 3 nouveaux MNH ont donc été produits à partir des différents MNS et du MNT PCI ayant donné les meilleurs résultats, à savoir basé sur une fenêtre de 50 mètres. Ils sont présentés en Annexe 6, figures 9 et 10.

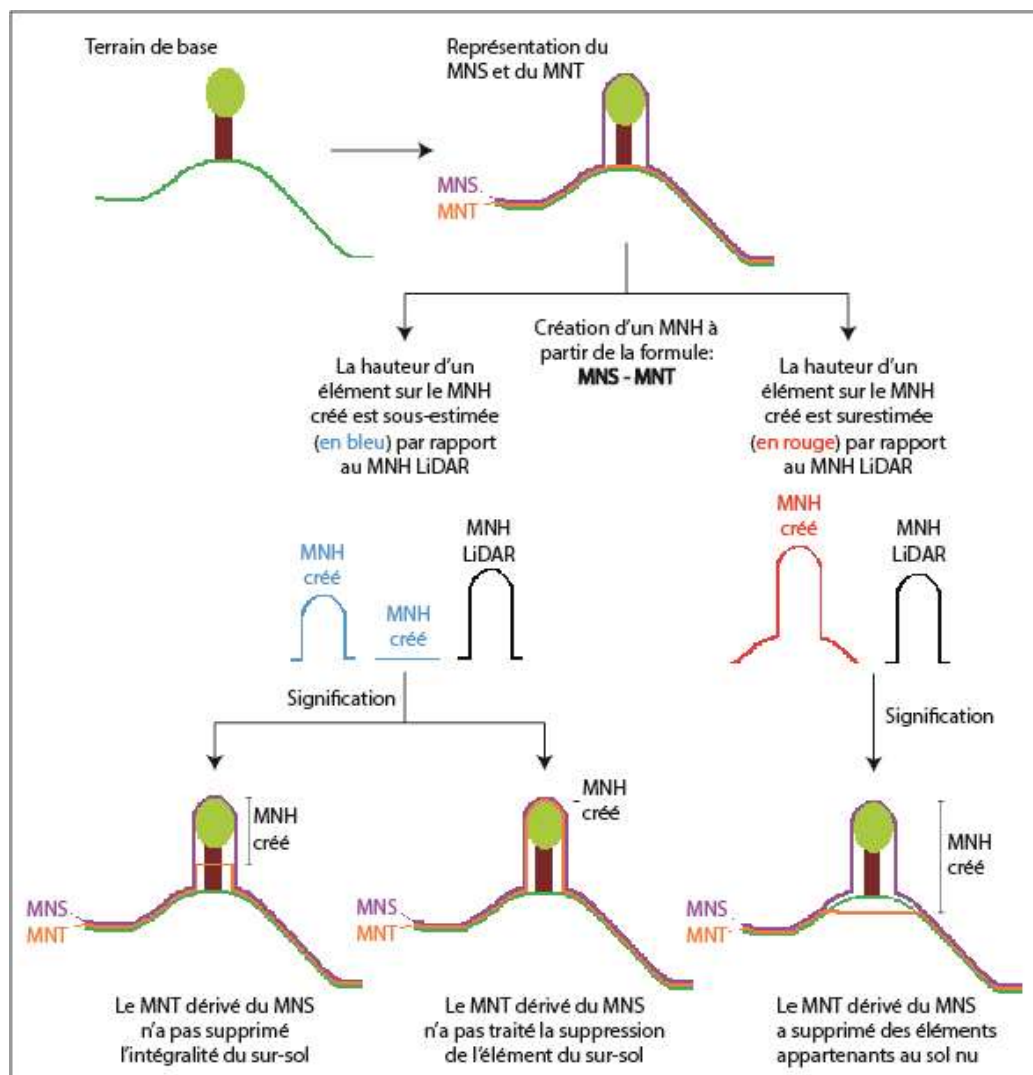
On observe la présence de valeurs négatives sur le MNH issu du MNS et du MNT PCI. Ce phénomène est étrange car le MNT PCI est directement issu du MNS PCI. Étant donné que l'algorithme DSM2DTM ne peut que retirer des éléments identifiés comme le sursol, le MNT en sortie devrait obligatoirement avoir des altitudes plus basses que le MNS en entrée. Étant donné que le MNH a été obtenu grâce à l'opération **MNS PCI – MNT PCI**, la présence de valeurs négative signifie que le MNT PCI est par moments passé au-dessus du MNS PCI. Aucune explication à ce phénomène n'a pour l'instant été trouvée.

3. Analyse et discussion

3.1. Interprétation des résultats

L'interprétation des tests globaux n'est pas la même pour tous les Modèles Numériques produits. En ce qui concerne le MNS et le MNT, les pixels du raster sur lesquels l'altitude a été surestimée par rapport à la référence LiDAR, sont représentés en rouge, ceux pour lesquels l'altitude a été sous-estimée, en bleu. Pour le MNH, le problème est plus complexe : sa qualité dépendra grandement des éléments à partir desquels il est dérivé à savoir le MNS et le MNT. L'interprétation de sa qualité peut être résumée par la figure 15.

Figure 15 : Guide à l'interprétation des tests de qualités globaux pour les MNH



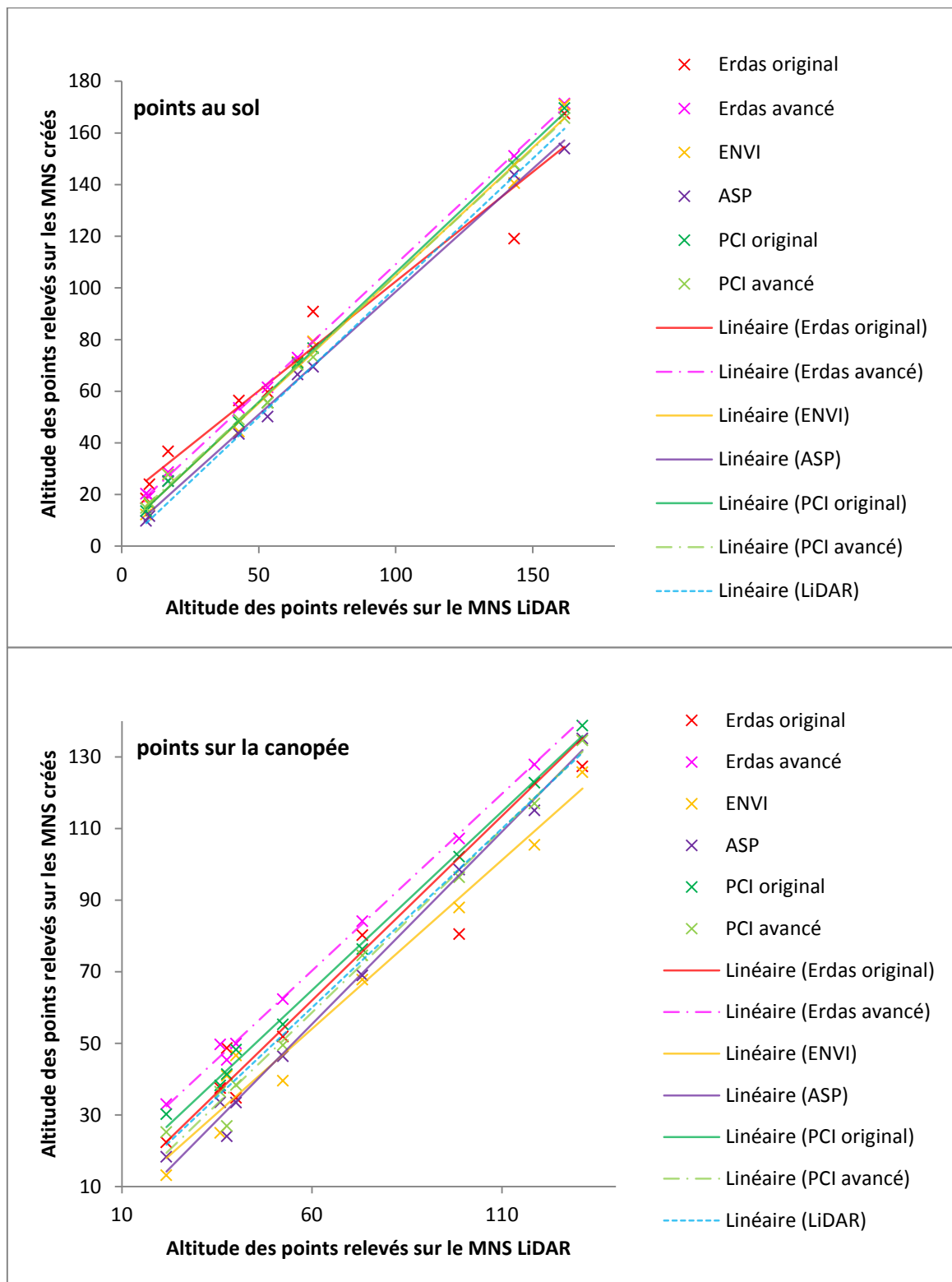
Les décalages en Z présents sur les MNS et les MNT par rapport à la référence LiDAR ne sont pas évoqués dans ce schéma. Si le MNS et/ou le MNT utilisé surestime ou sous-estime généralement les altitudes par rapport à la référence LiDAR, cette erreur va automatiquement se répercuter sur le MNH dérivé. Le seul cas où les décalages inhérents aux MNS et MNT utilisés ne rentreront pas en jeu est le cas où le MNT est directement dérivé du MNS utilisé. Dans cette configuration peut importe à quel point les Modèles Numériques sont décalés par rapport à la référence puisque ces décalages s'auto-annuleront lors de la création du MNH. En effet, le MNH étant basé sur la soustraction du MNS par le MNT, seul l'écart entre le MNS et le MNT est important. En conclusion, le MNH issu du MNS PCI et du MNT PCI aura l'avantage sur les autres d'être moins décalé par rapport à la référence LiDAR. On parle bien ici de décalage général à la moyenne par rapport au LiDAR et non d'écart-type important. Cela correspond donc à des

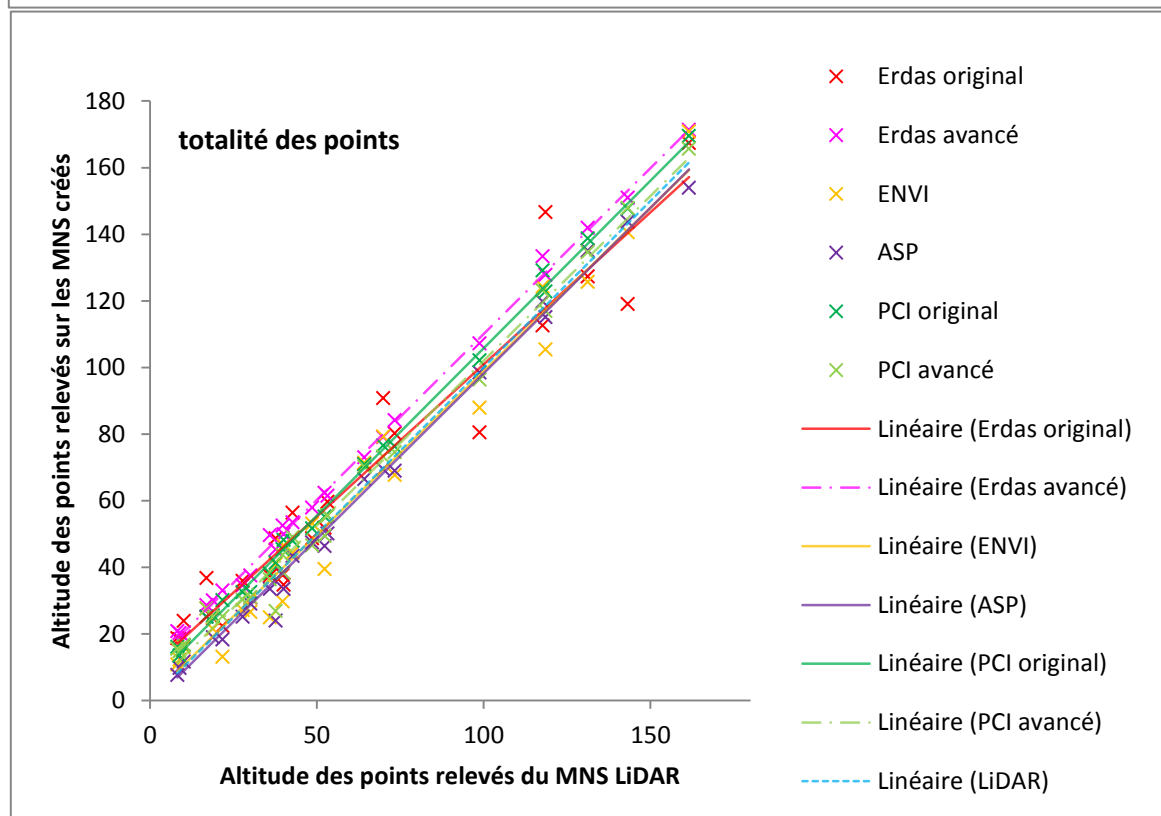
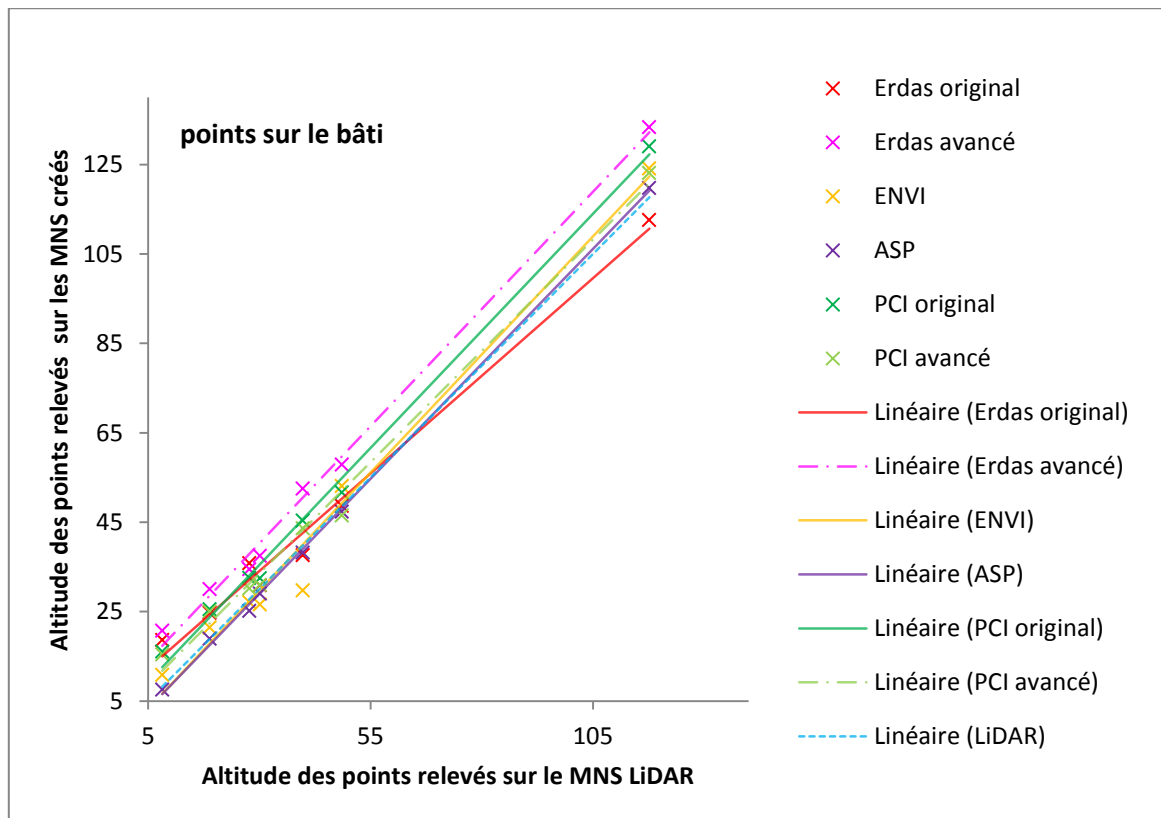
altitudes surestimées ou sous estimées de manière homogène sur le Modèle Numérique et non à un cas où les décalages sont hétérogènes.

3.2. Test de la qualité des MNS produits

Tests ponctuels

Figure 16: Comparaison entre les MNS créés et le MNS LiDAR sur des points particuliers/ Zone test de 4 km²

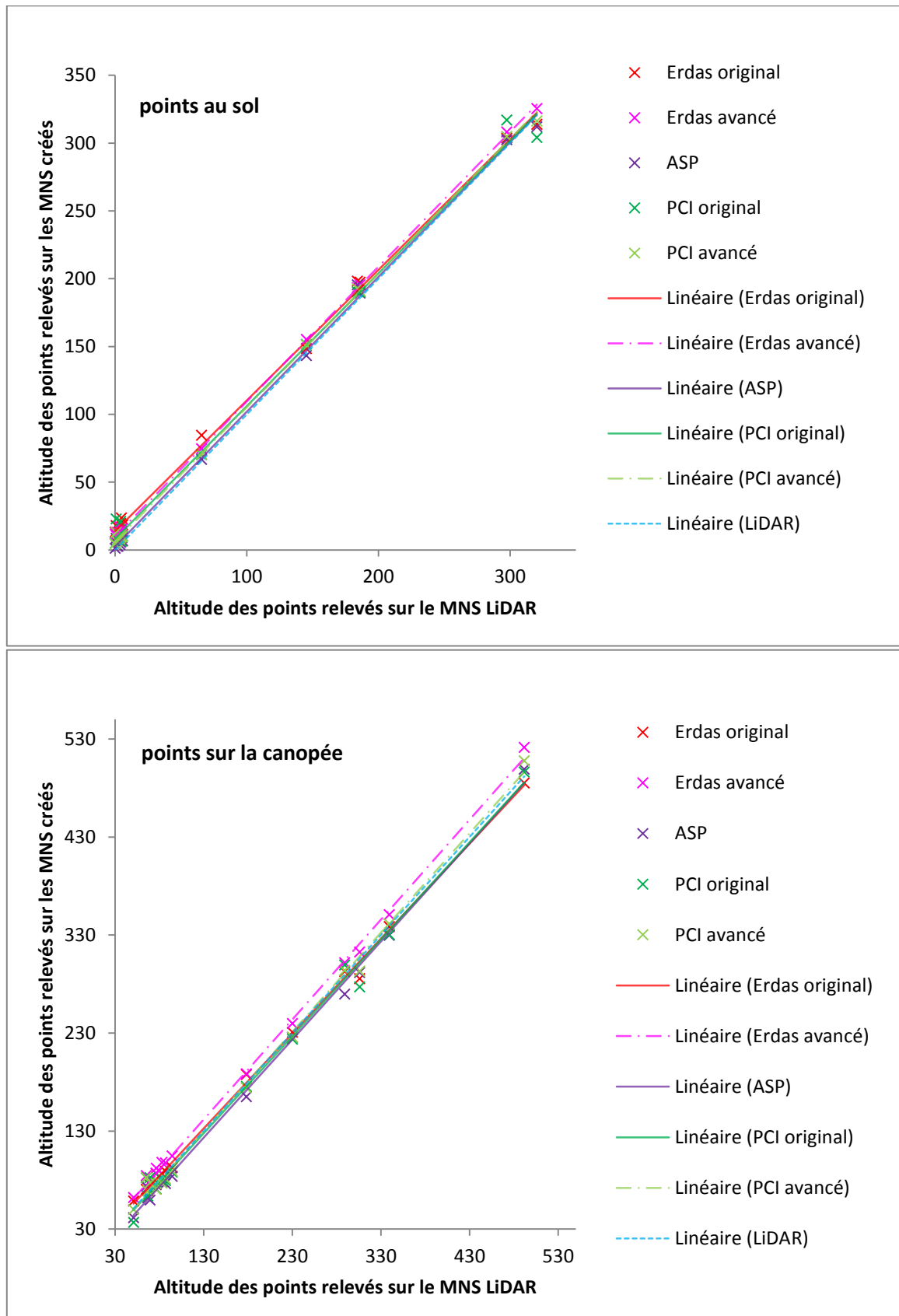


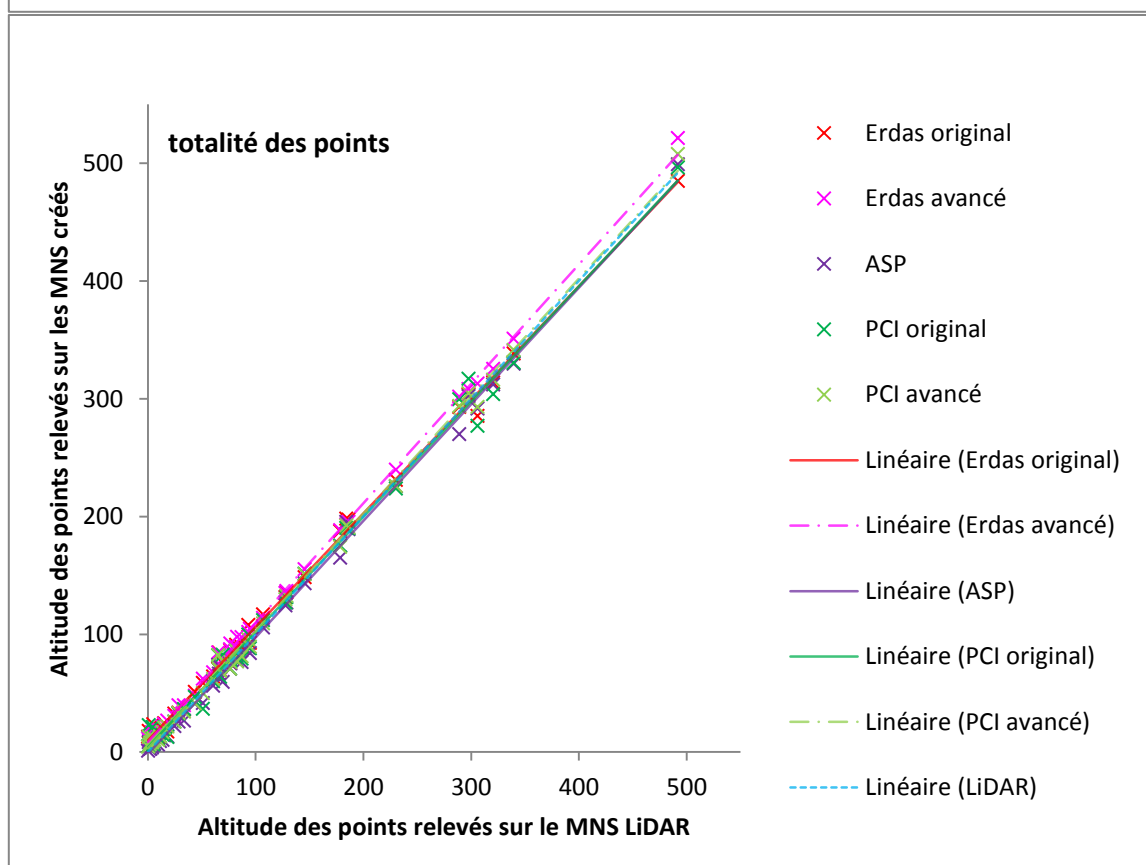
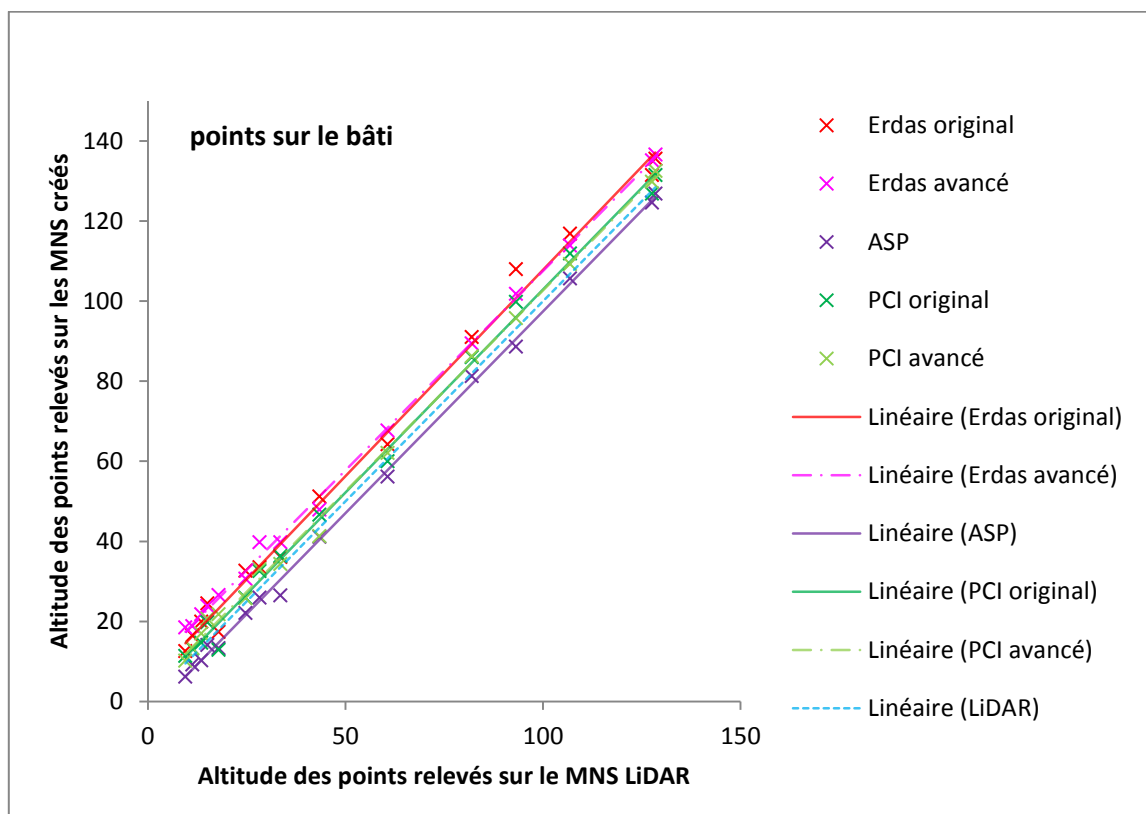


D’une manière générale, la plupart des courbes semblent parallèles à la référence LiDAR malgré un décalage en altitude. On observe que le MNS « Erdas original » est dans l’ensemble le moins bon par rapport à la référence. En revanche, les résultats obtenus sur Erdas avec les paramètres avancés sont bien plus concluants. Pour PCI, le changement de paramétrage a simplement permis de réduire le décalage en altitude avec la référence LiDAR. La courbe «ENVI» semble suivre celle du «LiDAR» de manière générale sauf pour les points relevés sur la canopée. Ceci est assez problématique car les informations sur la canopée sont les éléments majeurs de cette étude. Le MNS « ASP » est lui modérément bon.

En ce qui concerne l'estimation des altitudes des arbres, on retrouve un parallélisme entre les principaux MNS mais qui ne semble pas tout à fait être partagé avec la référence LiDAR. Cela peut être dû à l'évolution naturelle de la végétation entre 2008 et 2013, ce qui dans ce cas signifierait que la tendance générale des courbes représenterait la réalité terrain de 2013 et non celle de 2008.

Figure 17: Comparaison entre les MNS créés et le MNS LiDAR sur des points particuliers / Intégralité de la zone d'étude





Mise à part le défaut de parallélisme du MNS « Erdas original » il est difficile de distinguer les bons des mauvais MNS générés. Seul le décalage en Y des différentes courbes pourrait permettre de les départager. Mais ce n'est pas parce qu'un MNS va de manière générale surestimer les altitudes qu'il sera mauvais pour autant. On ne peut donc pas se contenter uniquement des courbes pour estimer la qualité des MNS produits.

Tests globaux

Zone test

Dans un premier temps, les tests globaux ont été réalisés sur la zone test de 4 km² (cf. Annexe 7, figure 12). D'une manière générale, les MNS provenant de PCI et le MNS « Erdas avancé » ont tendance à produire les surestimations d'altitude les plus importantes comme le montre les légendes de ces représentations. Cependant cette mauvaise estimation reste assez homogène dans l'ensemble puisque les seuls éléments ressortant véritablement sont quelques tâches fortement sous-estimées sans doute dues à des artefacts. On remarque sur le MNS « Erdas original » que les surestimations du sol sont plus présentes.

Le MNS « ENVI » possède de nombreux points dont la différence avec la référence LiDAR est nulle. Cependant l'allure générale du MNS est partagée entre la surestimation et la sous-estimation. Cela est le signe d'erreurs hétérogènes. Il semble même que le MNS « ENVI » n'interprète pas correctement le relief avec des surestimations au Sud-Ouest et des sous-estimations au Nord-Est.

Au final, c'est le MNS « ASP » qui semble être le plus proche de la référence LiDAR visuellement parlant.

Intégralité de la zone d'étude

Dans un second temps, les tests globaux ont été réalisés sur l'intégralité de la zone d'étude (cf. Annexe 7, figure 13). On remarque la présence de bandes verticales traversant le MNS du Nord au Sud. Ces bandes se manifestent par des différences d'élévation marquées. Rémy CRESSON avait supposé, dans son étude préliminaire sur le logiciel ASP, que cet artefact ne pouvait pas être attribué au MNS LiDAR utilisé pour obtenir cette différence car il n'était pas identique d'un MNS stéréoscopique à un autre. Selon lui ce phénomène provenait plutôt d'un défaut dans le pipeline du logiciel ASP ou d'une erreur dans les images Pléiades et leurs métadonnées (Cresson, 2014). Ce phénomène est certes plus visible avec le MNS « ASP », il n'en reste pas moins présent sur les autres images de différence. On peut donc en conclure que cet artefact n'est pas propre au logiciel ASP mais qu'il proviendrait plutôt d'un défaut sur le capteur Pléiade au moment de l'acquisition.

Il est étrange d'observer que contrairement à tous les autres MNS qui ont tendance à avoir des sous-estimations relativement aberrantes, le MNS « ASP » est le seul à surestimer excessivement certains points.

On peut aussi remarquer que pour des raisons inconnues, le MNS « PCI avancé » présente plus de tâches sous-estimées que le MNS « PCI original ». La modification des paramètres l'aurait donc rendu plus sensible à certains artefacts.

Enfin on remarque qu'aucun de ces tests ne semble présenter d'erreurs particulières liées au changement de relief. Les erreurs d'interprétations d'altitudes sont en effet aussi bien présentes sur le littoral que sur les espaces élevés au centre de l'île. Les erreurs d'estimation d'altitudes sont donc liées aux objets représentés (formations forestières denses, éléments réfléchissants la lumière) et non à la topographie.

Conclusion générale des résultats obtenus pour la création d'un MNS

Zone test

Tableau 2 : Statistiques des différences entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Zone test de 4 km²

Test ponctuel

Type sol	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ENVI	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé
Moyenne (en mètres)	8,06	9,62	5,21	0,32	5,85	5,53
Ecart-type (en mètres)	13,32	1,38	4,41	4,24	1,88	2,44
Coef de corrélation	0,9767	0,9998	0,9968	0,9981	0,9994	0,9992
Coef de détermination	0,9540	0,9995	0,9937	0,9962	0,9989	0,9984

Moyenne sol
5,76
4,61
0,9950
0,9901

Type arbre	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ENVI	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé
Moyenne (en mètres)	2,21	10,18	-6,43	-4,06	4,81	-1,22
Ecart-type (en mètres)	12,70	1,77	7,02	4,79	2,49	4,31
Coef de corrélation	0,9556	0,9991	0,9846	0,9962	0,9980	0,9947
Coef de détermination	0,9132	0,9981	0,9695	0,9925	0,9961	0,9895

Moyenne arbre
0,91
5,51
0,9881
0,9765

Type bâti	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ENVI	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne bâti
Moyenne (en mètres)	2,61	10,82	0,32	-0,66	6,00	3,45	3,76
Ecart-type (en mètres)	5,70	3,21	5,61	1,50	3,07	3,28	3,73
Coef de corrélation	0,9942	0,9975	0,9907	0,9996	0,9977	0,9959	0,9959
Coef de détermination	0,9884	0,9950	0,9816	0,9991	0,9955	0,9917	0,9919

Type général	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ENVI	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne général
Moyenne (en mètres)	4,43	10,16	-0,35	-1,53	5,34	2,52	3,43
Ecart-type (en mètres)	11,35	2,12	7,51	4,25	2,57	4,45	5,37
Coef de corrélation	0,9675	0,9989	0,9858	0,9955	0,9984	0,9950	0,9902
Coef de détermination	0,9361	0,9978	0,9719	0,9910	0,9968	0,9901	0,9806

Test global	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ENVI	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé
Moyenne (en mètres)	11,37	11,41	7,08	2,79	7,67	7,8
Ecart-Type (en mètres)	4,18	4,15	7,95	3,73	3,68	3,86

En ce qui concerne les tests ponctuels, c'est indéniablement le MNS « Erdas avancé » qui obtient les meilleurs résultats. Le MNS « ASP » est cependant meilleur pour ce qui est de l'estimation de l'altitude du bâti mais il faut rappeler que dans le contexte de notre étude il s'agit de l'élément le plus anodin.

Pour ce qui est du test global, le MNS « ASP » obtient de très bons résultats. Les MNS « PCI original » et « PCI avancé » ont des moyennes d'écarts plus élevées mais leurs écart-types sont faibles. Cela signifie que de manière générale les MNS issu de PCI surestiment les altitudes mais que ce décalage est homogène sur toute la zone test.

Les paramétrages avancés d'Erdas ont porté leurs fruits car les résultats obtenus sont bien meilleurs. On ne peut en revanche pas dire la même chose pour le logiciel PCI en ce qui concerne cet échantillon.

Pour les moyennes générales des statistiques sur les tests ponctuels, on remarque que la moyenne des écart-type des points sur la canopée est la plus élevée. Ceci signifie que ce sont les arbres qui ont été les moins biens estimés par les MNS produits. Cela n'est pas forcément étonnant car il faut rappeler qu'il existe un écart de 5 ans entre le MNS de référence et les images Pléiades. Ainsi il se peut que la configuration de la végétation ait changée durant ce laps de temps contrairement au sol et au bâti.

L'information principale que devait apporter ce tableau était une estimation de la qualité du MNS « ENVI » par rapport aux autres. Au vu des résultats médiocres obtenus sur ce logiciel et de la quantité de travail nécessaire à la création d'un MNS représentant tout Mayotte avec ENVI, il a été décidé de laisser cette solution de côté pour se concentrer sur les autres.

Intégralité de la zone d'étude

Tableau 3 : Statistiques des différences entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Intégralité de la zone d'étude

Test ponctuel						
Type sol	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne sol
Moyenne (en mètres)	10,87	9,52	2,01	6,39	5,33	6,82
Ecart-type (en mètres)	6,50	2,06	4,42	8,80	3,36	5,03
Coef de corrélation	0,9990	0,9999	0,9993	0,9972	0,9996	1,00
Coef de détermination	0,9980	0,9997	0,9985	0,9944	0,9992	1,00

Type arbre	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne arbre
Moyenne (en mètres)	1,39	12,50	-6,83	-2,67	0,33	0,94
Ecart-type (en mètres)	7,52	5,89	7,50	11,33	8,34	8,12
Coef de corrélation	0,9989	0,9993	0,9984	0,9964	0,9982	1,00
Coef de détermination	0,9977	0,9985	0,9969	0,9929	0,9964	1,00

Type bâti	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne bâti
Moyenne (en mètres)	6,38	7,77	-2,92	2,25	2,49	3,19

Ecart-type (en mètres)	3,74	1,61	1,70	2,88	1,97	2,38
Coef de corrélation	0,9970	0,9993	0,9993	0,9980	0,9990	1,00
Coef de détermination	0,9940	0,9986	0,9986	0,9960	0,9980	1,00

Type général	MNS Erdas original	MNS Erdas avancé	MNS ASP	MNS PCI original	MNS PCI avancé	Moyenne général
Moyenne (en mètres)	6,21	9,93	-2,58	1,99	2,72	3,65
Ecart-type (en mètres)	7,16	4,13	6,20	9,07	5,59	6,43
Coef de corrélation	0,9986	0,9994	0,9985	0,9969	0,9988	1,00
Coef de détermination	0,9971	0,9989	0,9971	0,9939	0,9976	1,00

Test global	Erdas n3	Erdas n4	ASP	PCI 1	PCI 2
Moyenne (en mètres)	12,09	12,11	2,89	7,86	7,97
Ecart-Type (en mètres)	6,92	6,97	9,39	6,58	8

Selon notre étude statistique, le MNS « Erdas avancé » est le plus proche de la référence LiDAR. On remarque cependant avec le test global que les altitudes des MNS issus d'Erdas sont dans l'ensemble les plus surestimées. Leur écart-type restent malgré tout relativement faible ce qui est le signe que les MNS sont simplement décalés en altitude par rapport à leur référence LiDAR.

Les paramétrages avancés de PCI ont cette fois-ci été efficaces au vue des statistiques puisque le MNS « PCI avancé » dépasse le MNS « PCI original » en de nombreux points.

Les écart-type ont bien augmenté par rapport aux relevés sur la zone test. Cela est dû à la multiplication des artefacts présents sur l'ensemble de l'île. Afin de réduire leur impact, un masque supprimant l'océan et les nuages a été appliqué sur les rasters de comparaison. Il reste cependant impossible de retirer l'intégralité des artefacts tout en conservant une emprise spatiale suffisamment vaste pour représenter exhaustivement l'intégralité de l'île.

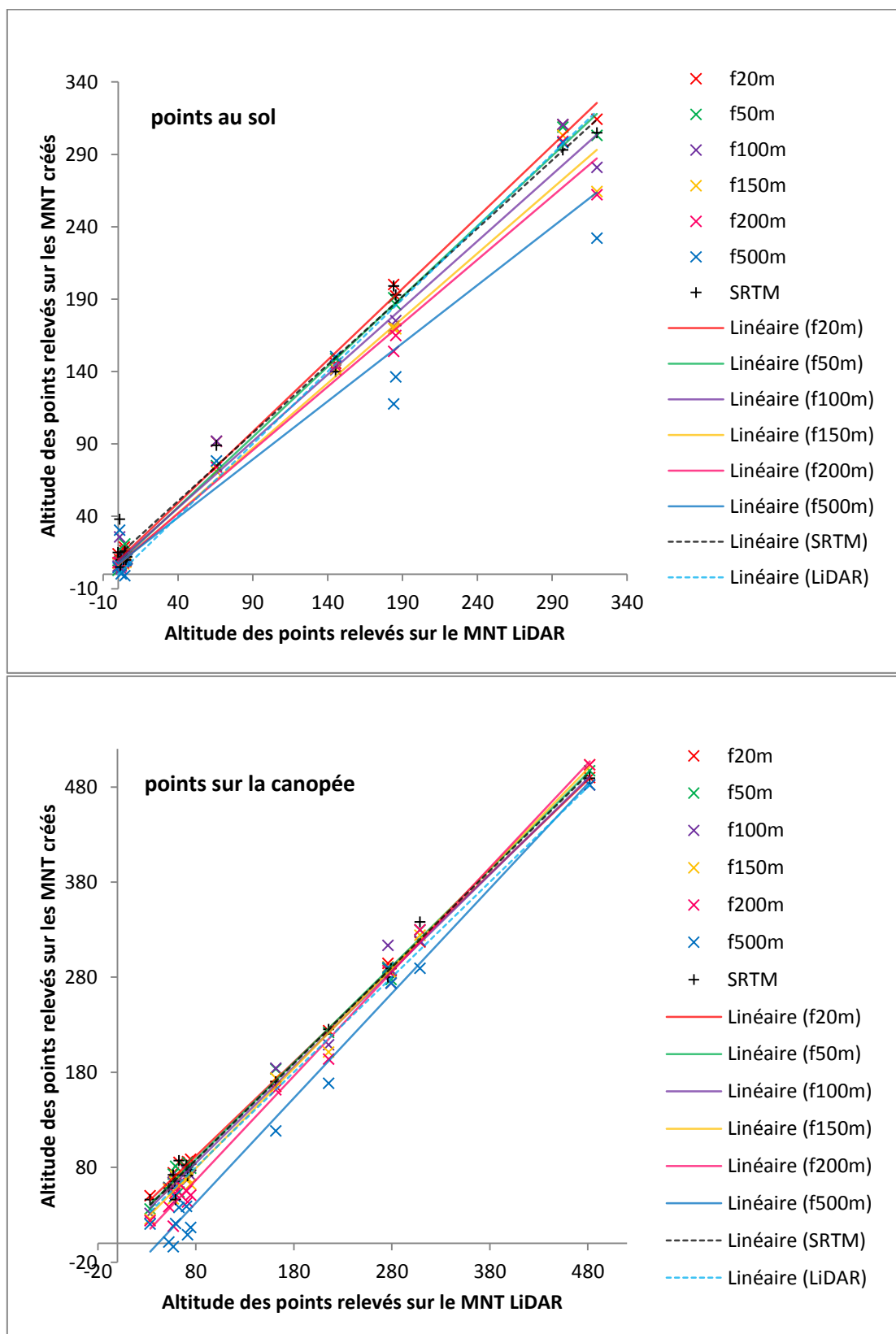
Encore une fois c'est sur les points relevés sur la canopée que l'écart-type général est le plus grand. Cette constatation semble donc montrer que l'écart de temps entre l'acquisition des données de référence et les données Pléiades crée un biais dans cette étude.

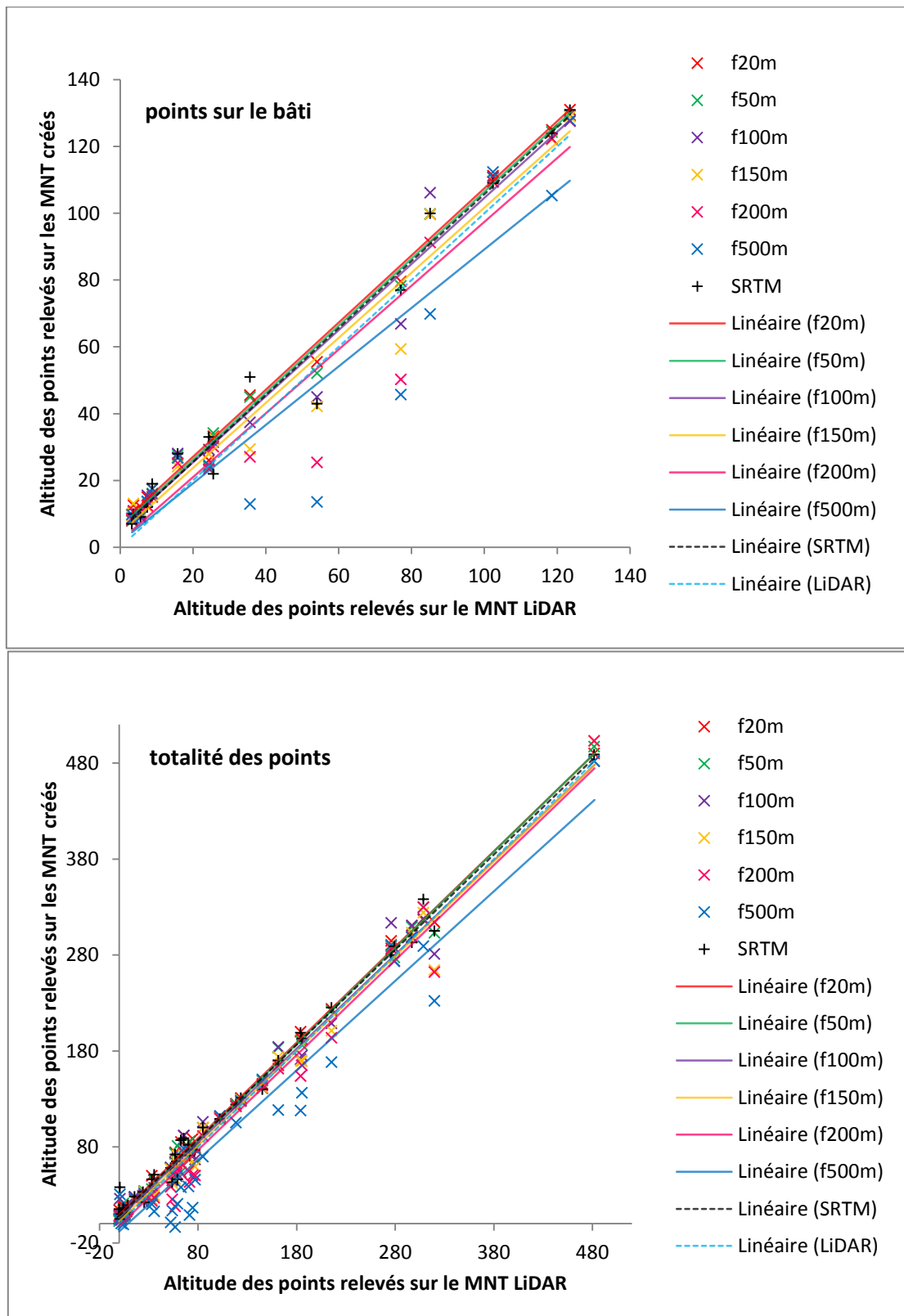
Au vu des résultats obtenus à la fois sur l'échantillon test de 4 km² et sur l'intégralité de Mayotte, il a été décidé de ne garder que les MNS les plus proches de la référence LiDAR pour la suite de cette étude. On décide de ne conserver qu'un MNS par logiciel. Etant donné que les paramétrages avancés d'Erdas et de PCI ont tous deux fait leurs preuves, l'étude qui suit se concentre sur eux. Le MNS « ASP » est aussi conservé car il a donné des résultats concluants et il s'agit du seul logiciel libre inclut dans cette étude. Comme évoqué précédemment, le MNS issu d'ENVI est laissé de côté du fait de la difficulté de générer un MNS représentant l'intégralité de Mayotte et de ses résultats assez faibles obtenus sur la zone test.

3.3. Test de la qualité des MNT produits

Tests ponctuels

Figure 18 : Comparaison entre les MNT créés et le MNT LiDAR sur des points particuliers





On observe que plus la taille de la fenêtre de recherche de l'algorithme DSM2DTM est élevée et plus le MNS PCI utilisé en entrée sera « creusé ». En effet, cette opération se contente de retirer du relief en se basant sur les altitudes minimales présentes dans la fenêtre. Plus cette fenêtre est grande et plus l'algorithme identifiera un point bas. Il est donc normal que les altitudes identifiées sur les points relevés diminuent avec l'augmentation de la taille de la fenêtre.

Mis à part les MNT issus des fenêtres de 200 et 500 mètres, les MNT créés suivent assez bien les courbes du MNT LiDAR et du MNT SRTM de référence. Il semble qu'à partir d'un certain seuil de taille de fenêtre l'algorithme DSM2DTM « creuse » trop le MNS d'origine.

Tests globaux

Les tests globaux ont été réalisés sur l'intégralité de la zone d'étude (cf. Annexe 7, figure 14). On observe que dès que la taille de la fenêtre atteint les 150 mètres, la topographie générale de l'île de Mayotte est « creusée » par l'algorithme DSM2DTM. On identifie cela aux lignes bleues (couleur représentant la sous-estimation d'une altitude) qui suivent le relief de l'île.

Le rôle principal de ces MNT est de retirer l'intégralité du sursol. Cependant on observe que les grandes formations forestières représentées par des tâches rouges (couleur représentant la surestimation d'une altitude) présentes vers le centre de Mayotte ne sont pas effacées et cela quelle que soit la taille de fenêtre utilisée. Il faut aussi souligner le fait que le MNT SRTM lui-même ne parvient pas à extraire totalement ces formations végétales.

Un zoom sur ces MNT produits (cf. Annexe 7, figure 15) permet d'observer les résultats plus précisément. On remarque que le MNT issu d'une fenêtre de 20 mètres est celui qui sous-estime le moins les altitudes. Cependant, on observe aussi que de nombreux éléments du sursol n'ont pas été retirés. Cela est problématique pour les éléments isolés. Si une fenêtre de 20 mètres est trop petite pour identifier un point au sol au moment du traitement d'un arbre isolé, alors on peut être certain que le MNT qui en sera issu ne remplira pas son rôle.

Le MNT issu d'une fenêtre de 50 mètres est parvenu lui à retirer un bon nombre d'éléments isolés mais dès lors que les arbres sont groupés l'opération DSM2DTM n'est plus en mesure d'identifier de points bas avec cette taille de fenêtre.

Les MNT issus de fenêtres de 100 mètres et plus arrivent à supprimer des arbres groupés mais on peut voir qu'à partir de ce seuil la topographie commence à être particulièrement affectée. Il faut tout de même souligner que pour une raison inconnue, le MNT issu d'une fenêtre de 500 mètres ne parvient pas à retirer le groupe d'arbres présents au Sud alors que cela était possible dès 100 mètres.

En résumé, aucun des MNT présenté ici n'est en mesure de supprimer totalement le sursol. En ajoutant à cela le fait que les MNT basés sur de grandes fenêtres « creusent » la topographie, il n'y a aucune raison de privilégier les MNT basés sur de grandes fenêtres.

Malgré le fait qu'il soit basé originalement sur une résolution de 90 mètres, il faut reconnaître que le MNT SRTM est probablement l'un des plus proches de la référence LiDAR.

Conclusion générale des résultats obtenus pour la création d'un MNT

Tableau 4 : Statistiques des différences entre les MNT produits et le MNT LiDAR

Test ponctuel

Ex sol	MNT SRTM	MNT f20m	MNT f50m	MNT f100m	MNT f150m	MNT f200m	MNT f500m	Moyenne sol (mnt pci)
Moyenne (en mètres)	8,69	6,79	4,06	1,72	-4,95	-5,06	-9,74	-1,20
Ecart-type (en mètres)	15,02	8,82	9,01	19,41	20,34	21,61	36,05	19,21
Coef de corrélation	0,9940	0,9975	0,9990	0,9936	0,9970	0,9962	0,9775	0,9935
Coef de détermination	0,9880	0,9949	0,9980	0,9872	0,9941	0,9925	0,9556	0,9870

Ex arbre	MNT SRTM	MNT f20m	MNT f50m	MNT f100m	MNT f150m	MNT f200m	MNT f500m	Moyenne arbre (mnt pci)
Moyenne (en mètres)	11,06	13,16	8,28	4,69	1,18	-5,16	-27,03	-0,81
Ecart-type (en mètres)	9,87	5,17	8,63	13,37	12,90	19,19	25,78	14,17
Coef de corrélation	0,9980	0,9996	0,9991	0,9966	0,9988	0,9972	0,9920	0,9972
Coef de détermination	0,9959	0,9991	0,9982	0,9933	0,9975	0,9945	0,9841	0,9945

Ex bâti	MNT SRTM	MNT f20m	MNT f50m	MNT f100m	MNT f150m	MNT f200m	MNT f500m	Moyenne bâti (mnt pci)
Moyenne (en mètres)	5,10	7,51	6,65	5,26	3,41	-0,37	-6,99	2,58
Ecart-type (en mètres)	8,47	3,63	4,41	7,72	7,83	11,54	16,98	8,69
Coef de corrélation	0,9855	0,9972	0,9958	0,9878	0,9870	0,9717	0,9341	0,9790
Coef de détermination	0,9713	0,9945	0,9917	0,9757	0,9742	0,9442	0,8726	0,9588

Général	MNT SRTM	MNT f20m	MNT f50m	MNT f100m	MNT f150m	MNT f200m	MNT f500m	Moyenne général (mnt pci)
Moyenne (en mètres)	7,49	8,99	7,03	4,39	1,25	-3,37	-14,38	0,65
Ecart-type (en mètres)	9,76	5,92	7,17	11,84	12,44	16,21	27,01	13,43
Coef de corrélation	0,9961	0,9986	0,9979	0,9944	0,9937	0,9894	0,9701	0,9907
Coef de détermination	0,9923	0,9972	0,9959	0,9887	0,9875	0,9788	0,9410	0,9815

Test global	MNT SRTM	MNT f20m	MNT f50m	MNT f100m	MNT f150m	MNT f200m	MNT f500m
Moyenne (en mètres)	9,51	10,48	8,14	5,61	3,36	1,21	-7,48
Ecart-type (en mètres)	6,46	6,88	6,69	8,49	11,02	13,42	23,08

De manière générale, on remarque que ce sont les MNT générés à partir d'une fenêtre réduite (20 et 50 mètres) qui sont les plus proches du MNT LiDAR. Les MNT réalisés à partir d'une fenêtre plus grande ont tendance à sous-estimer les altitudes. Cela est dû au fait qu'à partir d'un certain seuil le module de transformation du MNS en MNT ne se contente plus de retirer les éléments du sursol mais va jusqu'à « creuser » la topographie.

Pour ce qui est des tests ponctuels, le MNT issu d'une fenêtre de 20 mètres est en mesure de relativement bien estimer les altitudes des points. Cependant, il faut savoir qu'en ce qui concerne la végétation, un certain nombre de points relevés sont basés sur des arbres isolés. De ce fait, le test ponctuel nous informe juste que ce MNT arrive relativement bien à estimer les altitudes aux emplacements des anciens arbres isolés (étant donné qu'ils ont été retirés par l'algorithme DSM2DTM). Les MNT issus des fenêtres de 20 et 50 mètres ne sont pas les meilleurs pour retirer les éléments du sursol mais dès lors que la topographie commence à être affectée, l'écart-type des tests globaux commence à grandement augmenter.

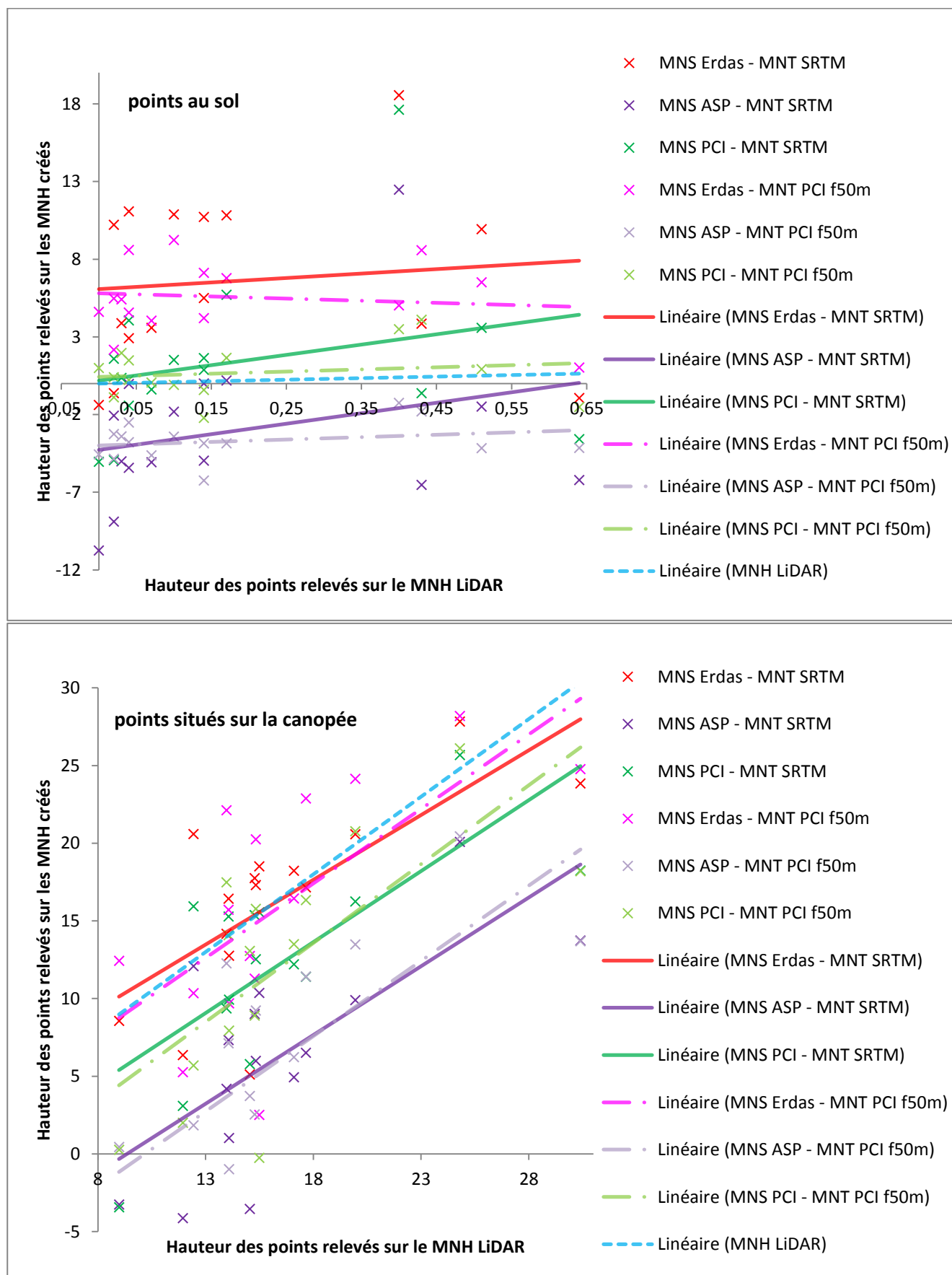
Si les moyennes des tests globaux semblent se rapprocher de la référence LiDAR à mesure que la taille de fenêtre augmente, cela est dû au fait que le MNS « PCI avancé » utilisé pour la création des MNT surestimait dès le départ les altitudes par rapport à la référence LiDAR. Ainsi, plus un MNS est « creusé » et plus l'écart existant au départ sera compensé par les sous-estimations du relief. Les MNT créés vont donc faussement se rapprocher de la référence LiDAR. De ce fait, en ce qui concerne le test global il vaut mieux se baser sur les écart-types calculés par rapport à la référence LiDAR qui eux sont parlants.

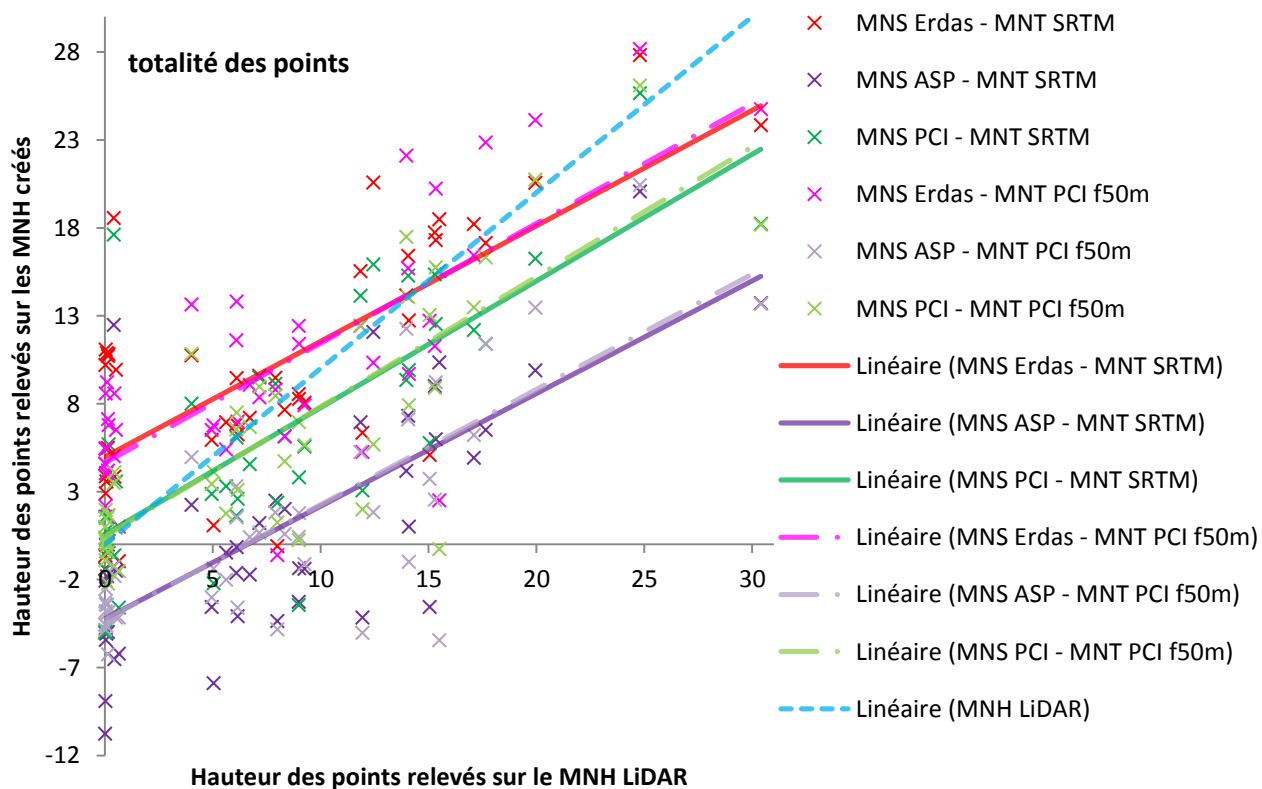
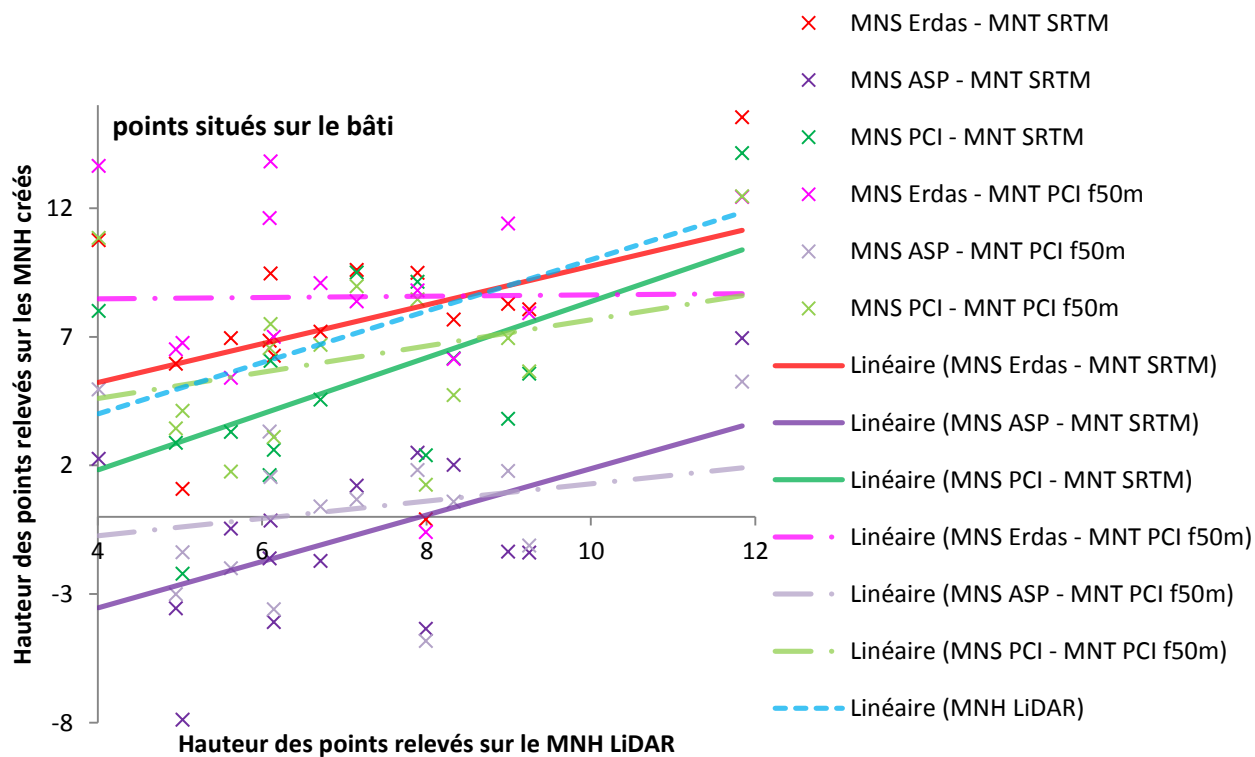
Au final, c'est le MNT généré à partir d'une fenêtre de 50 mètres qui semble être le plus à même de retirer les éléments du sursol présents sur le MNS tout en évitant de trop affecter la topographie. Il faut cependant remarquer que certains éléments du sursol compacts tels que les formations végétales denses que sont les réserves forestières situées au milieu de l'île ne sont pas soustraites. Ces éléments sont particulièrement problématiques car leurs dimensions sont du même ordre de grandeur que les éléments de la topographie. De ce fait il est difficile pour l'algorithme de les distinguer l'un de l'autre.

3.4. Test de la qualité des MNH produits

Tests ponctuels

Figure 19 : Comparaison entre les MNH créés et le MNH LiDAR sur des points particuliers





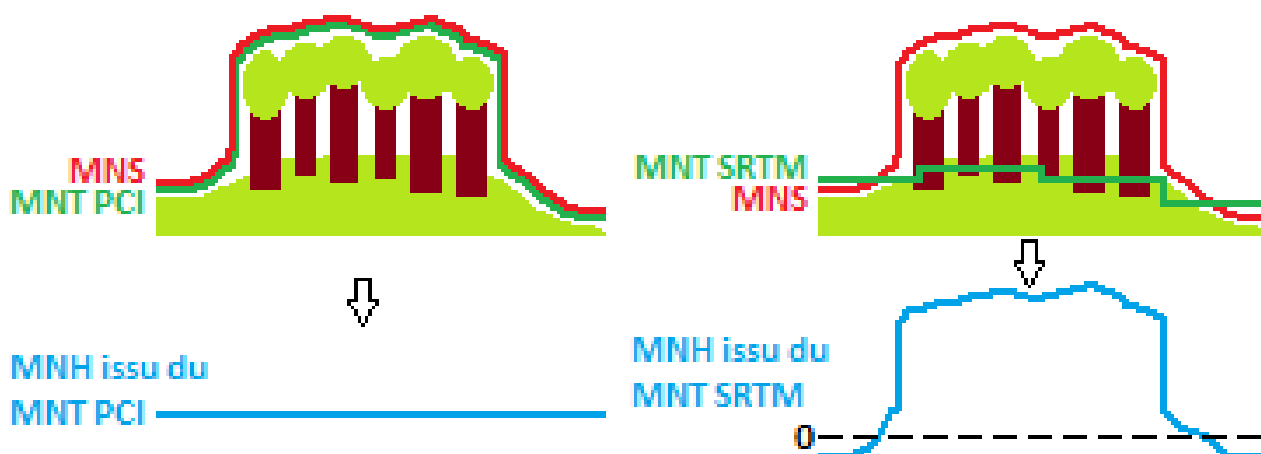
Ces courbes présentent une tendance évidente: si les MNH partagent un même MNS, le décalage en hauteur par rapport à la référence LiDAR est du même ordre, alors que si les MNH partagent un même MNT la pente par rapport à la courbe de référence LiDAR est du même ordre. Cela laisse supposer que la moyenne des écarts de hauteur d'un MNH par rapport à la référence LiDAR dépend en majeure partie du MNS utilisé. D'autre part, l'écart-type des écarts de hauteur d'un MNH par rapport à la référence LiDAR dépend en majeure partie du MNT utilisé. Même si certains de ces MNH sont relativement décalés en hauteur, il est toujours possible de les calibrer par la suite en appliquant une soustraction ou une addition générale à tout le raster. De ce fait c'est donc le parallélisme avec la courbe de référence qui sera le critère de sélection déterminant.

Plus précisément, il semble que ce sont les MNH issus du MNT PCI qui suivent le mieux la courbe de référence LiDAR en ce qui concerne les points au sol, alors que la tendance s'inverse pour les points sur le bâti. Il est difficile de trancher pour les points situés sur la canopée en ne se basant que sur ce graphe.

Tests globaux

Les tests globaux ont été réalisés sur l'intégralité de la zone d'étude (cf. Annexes 7, figure 16) et des zooms sur une portion de 4 km² ont été réalisés pour plus de lisibilité (cf. Annexes 7, figure 17). Dans l'ensemble, ces MNH estiment des hauteurs proches de la référence LiDAR. On remarque toutefois que les MNH issus du MNT PCI surestiment plus les hauteurs. Les MNH issus du MNT SRTM présentent des écarts moins accentués mais plus fréquents. Cela s'explique par la faible résolution de ce MNT (90 mètres), donc une tendance à lisser le terrain ce qui multiplie les mauvaises estimations de hauteur. Ces MNH issus du MNT SRTM ont malgré tout l'avantage de représenter les zones de végétation dense d'une manière plus véridique. En effet, l'algorithme DSM2DTM n'étant pas en mesure de soustraire les espaces densément boisés du MNS utilisé, le MNT PCI en sortie interprétera ces espaces comme un sol nu. Par conséquent, ils n'apparaîtront pas sur les MNH issus du MNT PCI. Cela est particulièrement visible sur la figure 10 de l'Annexe 6 où la zone forestière dense située en bas apparaît plus marquée sur les MNH issus du MNT SRTM. La figure 20 explique ce phénomène.

Figure 20 : Représentation de la différence de traitement des zones densément boisées entre les MNH issus des MNT PCI et ceux issus du MNT SRTM



Conclusion générale des résultats obtenus pour la création d'un MNH

Tableau 5 : Statistiques des différences entre les MNH produits et le MNH LiDAR

Test ponctuel						
Type sol	MNS Erdas-MNT SRTM	MNS ASP-MNT SRTM	MNS PCI-MNT SRTM	MNS Erdas-MNT PCI	MNS ASP-MNT PCI	MNS PCI-MNT PCI
Moyenne (en mètres)	6,42	-3,22	1,21	5,38	-3,90	0,50
Ecart-type (en mètres)	5,67	5,35	5,40	2,35	1,20	1,69

Coef de corrélation	0,1041	0,2575	0,2515	-0,1226	0,2569	0,1650
Coef de détermination	0,0108	0,0663	0,0632	0,0150	0,0660	0,0272

Type arbre	MNS Erdas-MNT SRTM	MNS ASP-MNT SRTM	MNS PCI-MNT SRTM	MNS Erdas-MNT PCI	MNS ASP-MNT PCI	MNS PCI-MNT PCI
Moyenne (en mètres)	-0,10	-10,16	-4,23	-0,52	-10,37	-4,45
Ecart-type (en mètres)	4,45	4,97	4,90	5,65	5,35	5,56
Coef de corrélation	0,7121	0,6897	0,7045	0,6690	0,6927	0,6958
Coef de détermination	0,5071	0,4757	0,4964	0,4476	0,4798	0,4841

Type bâti	MNS Erdas-MNT SRTM	MNS ASP-MNT SRTM	MNS PCI-MNT SRTM	MNS Erdas-MNT PCI	MNS ASP-MNT PCI	MNS PCI-MNT PCI
Moyenne (en mètres)	0,47	-7,84	-1,90	1,48	-6,77	-0,91
Ecart-type (en mètres)	3,41	3,05	3,27	4,23	3,19	3,20
Coef de corrélation	0,4122	0,5149	0,5604	0,0139	0,2283	0,3209
Coef de détermination	0,1699	0,2651	0,3140	0,0002	0,0521	0,1030

Type général	MNS Erdas-MNT SRTM	MNS ASP-MNT SRTM	MNS PCI-MNT SRTM	MNS Erdas-MNT PCI	MNS ASP-MNT PCI	MNS PCI-MNT PCI
Moyenne (en mètres)	2,26	-7,08	-1,64	2,11	-7,01	-1,62
Ecart-type (en mètres)	5,39	5,33	5,04	4,87	4,47	4,29
Coef de corrélation	0,7183	0,7199	0,7604	0,7667	0,8005	0,8214
Coef de détermination	0,5159	0,5183	0,5782	0,5878	0,6409	0,6747

Test global	MNS Erdas-MNT SRTM	MNS ASP-MNT SRTM	MNS PCI-MNT SRTM	MNS Erdas-MNT PCI	MNS ASP-MNT PCI	MNS PCI-MNT PCI
Moyenne (en mètres)	2,6	-7,58	-1,54	3,98	-5,23	-0,15
Ecart-type (en mètres)	8,9	178,28	9,99	8,76	10,59	8,53

Moyenne sol (en mètres) (MNT SRTM)	Moyenne sol (en mètres) (PCI)	Moyenne sol (en mètres) (générale)
1,47	0,66	1,06
5,47	1,75	3,61
0,20	0,10	0,15
0,05	0,04	0,04

Moyenne arbre (en mètres) (MNT SRTM)	Moyenne arbre (en mètres) (MNT PCI)	Moyenne arbre (en mètres) (générale)
-4,83	-5,12	-4,97
4,77	5,52	5,15
0,70	0,69	0,69
0,49	0,47	0,48

Moyenne bâti (en mètres) (MNT SRTM)	Moyenne bâti (en mètres) (MNT PCI)	Moyenne bâti (en mètres) (générale)
-3,09	-2,06	-2,58
3,24	3,54	3,39
0,50	0,19	0,34
0,25	0,05	0,15

Moyenne générale (en mètres) (MNT SRTM)	Moyenne générale (en mètres) (MNT PCI)	Moyenne générale (en mètres) (générale)
-2,15	-2,17	-2,16
5,26	4,55	4,90
0,73	0,80	0,76
0,54	0,63	0,59

Test global (en mètres) (MNT SRTM)	Test global (en mètres) (MNT PCI)
-2,17	-0,47
65,72	9,29

Dans tous les cas on observe un décalage entre les MNH générés et le MNH LiDAR. Il semble malheureusement que ce soit sur les points situés au sommet de la canopée que les MNH soit les plus erronés. Cela est dû à l'évolution naturelle de la végétation durant les 5 années qui séparent les dates d'acquisition entre les images Pléiades et la référence LiDAR. On retrouve dans ce tableau la logique de détermination des « moyennes » et des « écarts-type » selon les MNS et MNT utilisés comme le montre le tableau 6. En effet dès lors qu'un même MNS est utilisé, les moyennes des écarts à la référence des MNH résultants sont identiques. Lorsqu'un même MNT est utilisé, c'est cette fois les écarts-types à la référence des MNH résultants qui sont identiques.

Tableau 6 : Représentation de l' « effet de détermination » des moyennes et des écart-types selon les MNS et MNT utilisés

Général	MNS Erdas / MNT SRTM	MNS ASP / MNT SRTM	MNS PCI / MNT SRTM	MNS Erdas / MNT PCI	MNS ASP / MNT PCI	MNS PCI / MNT PCI
Moyenne	2,26	-7,08	-1,64	2,11	-7,01	-1,62
Ecart-type	5,39	5,33	5,04	4,87	4,47	4,29

Cet élément est particulièrement intéressant car il démontre qu'au final la qualité d'un MNH sera avant tout définie par le MNT utilisé. Il nous faut donc identifier quel MNT est le plus approprié pour la création d'un MNH. Les MNH issus du MNT SRTM sont apparemment meilleurs pour ce qui est de l'estimation moyenne de la hauteur des points du sursol tels que la végétation et le bâti, alors que les MNH issus du MNT PCI représentent mieux les points au sol. Cependant, cela est juste une preuve que le MNT PCI est proche des MNS créés aussi bien sur les points au sol que sur les points sur le sursol.

Le rôle d'un MNH est plus d'estimer la hauteur des points du sursol que des points au sol. Le MNT SRTM est certes plus grossier mais il est le seul MNT à être en mesure de supprimer les éléments du sursol groupés tels que la végétation et le bâti.

Il reste à savoir maintenant quel est le MNS le plus adapté pour la création d'un MNH. En ce qui concerne les MNH issus du MNT SRTM les résultats sont assez partagés. ASP est le meilleur pour l'estimation des points au sol mais les MNH issus du MNT PCI sont bien meilleurs pour cela. PCI est le meilleur pour l'estimation du bâti mais ces informations restent assez anodines par rapport au sujet d'étude. Le MNH issu d'Erdas, quant à lui est à la fois le meilleur pour l'estimation des hauteurs d'arbre et sur le test global. Pour ce qui est des MNH issus du MNT PCI, les statistiques générales des points relevés ainsi que le test global montrent que c'est le MNH issu du MNS PCI qui a produit les résultats les plus proches du LiDAR. L'hypothèse selon laquelle le MNH issu du MNS et du MNT PCI devrait être le moins décalé par rapport à la référence LiDAR (voir « 3.1. Interprétation des résultats ») pourrait expliquer cela. Dans ces conditions les mauvaises statistiques des autres MNH seraient dues aux multiples décalages existants de base dans les MNS créés et le MNT PCI.

Au vu des résultats obtenus et de l'objectif de ce stage, il semble logique de choisir la solution de créer un MNH en se basant sur un MNS généré sous Erdas et du MNT SRTM. Cependant, le MNH issu intégralement du logiciel PCI peut aussi être intéressant. Les hauteurs des formations forestières denses sont certes moins bien estimées mais il est tout de même en mesure de bien identifier les éléments isolés.

De plus, la théorie selon laquelle les décalages d'un MNS et d'un MNT d'une même source s'annulent lors de la création d'un MNH rend cette solution intéressante. En effet, cela signifie que le MNH généré nécessitera moins de post-traitement.

Calibrage des MNH sur une référence

Cette première version des MNH obtenus est de bonne qualité. Il existe toutefois une méthode pour améliorer le résultat. Elle consiste à effectuer une calibration de ces produits par rapport à une référence. En effet, lors du test ponctuel un Modèle Numérique est considéré comme fiable si sa courbe est la plus parallèle possible à celle de la référence LiDAR. Si le décalage de la courbe en Y n'est pas trop important, il est possible de le calibrer. Il suffit alors d'ajouter ou de supprimer au raster la valeur correspondant à l'écart existant entre celui-ci et sa référence. Pour plus de cohérence cet écart est estimé uniquement à partir de points situés au sol. Cette opération a été effectuée sur les 6 MNH créés afin de visualiser l'effet d'une calibration. Les résultats en sont présentés à l'Annexe 6 figure 11. On y remarque que les pixels ayant une hauteur de 0 mètre sont bien calés sur le sol, comme recherché par cette opération.

Afin d'avoir une idée de la qualité de ces MNH calibrés, on crée une représentation cartographique de leur comparaison avec le MNH LiDAR (cf. Annexe 7 figure 18). Il faut cependant rappeler que nous comparons ici des MNH calibrés sur une référence avec cette même référence. Ce test de qualité n'est de ce fait pas objectif. On remarque que les MNH issus du MNT SRTM présentent encore de nombreuses surestimations et sous-estimations des hauteurs dues à l'effet de lissage généré par la trop basse résolution du MNT SRTM. Les MNH issus du MNT PCI présentent des formes assez nettes (cf. Annexe 6 figure 11) mais lors de la comparaison avec le MNH LiDAR on remarque qu'il reste des éléments dont les hauteurs sont surestimées ou sous-estimées. Ils correspondent à des éléments du sursol non retirés sur le MNT PCI. Le MNT PCI ne parvient pas de base à supprimer l'intégralité du sursol, la calibration ne changera rien à cela.

Il existe cependant un moyen de calibrer un Modèle Numérique de Hauteur sans s'aider d'une quelconque référence. En effet par définition, dans un MNH les points situés au sol ont pour valeur 0.

Après avoir relevé la valeur d'un ensemble de points identifiés comme étant au sol sur l'orthophoto, il est possible d'estimer un décalage moyen des hauteurs par rapport à la réalité. La calibration des MNS et des MNT est cependant impossible sans référence.

Afin de départager d'une manière plus exhaustive les différentes solutions qui s'offrent à nous, de nouveaux tests sont réalisés sur un autre jeu de données.

3.5. Validation des résultats / Test sur le Brésil

MNS créés

Comme évoqué précédemment, deux MNS représentant une zone de parcelle au Brésil ont été créés à partir des logiciels Erdas et PCI (cf. Annexe 8, figure 19). Un zoom sur une parcelle d'essais clonaux a été réalisé afin de mieux visualiser le rendu (cf. Annexe 8, figure 20). On observe sur le MNS Erdas que l'effet d'interpolation crée des plaques triangulaires.

MNT créés

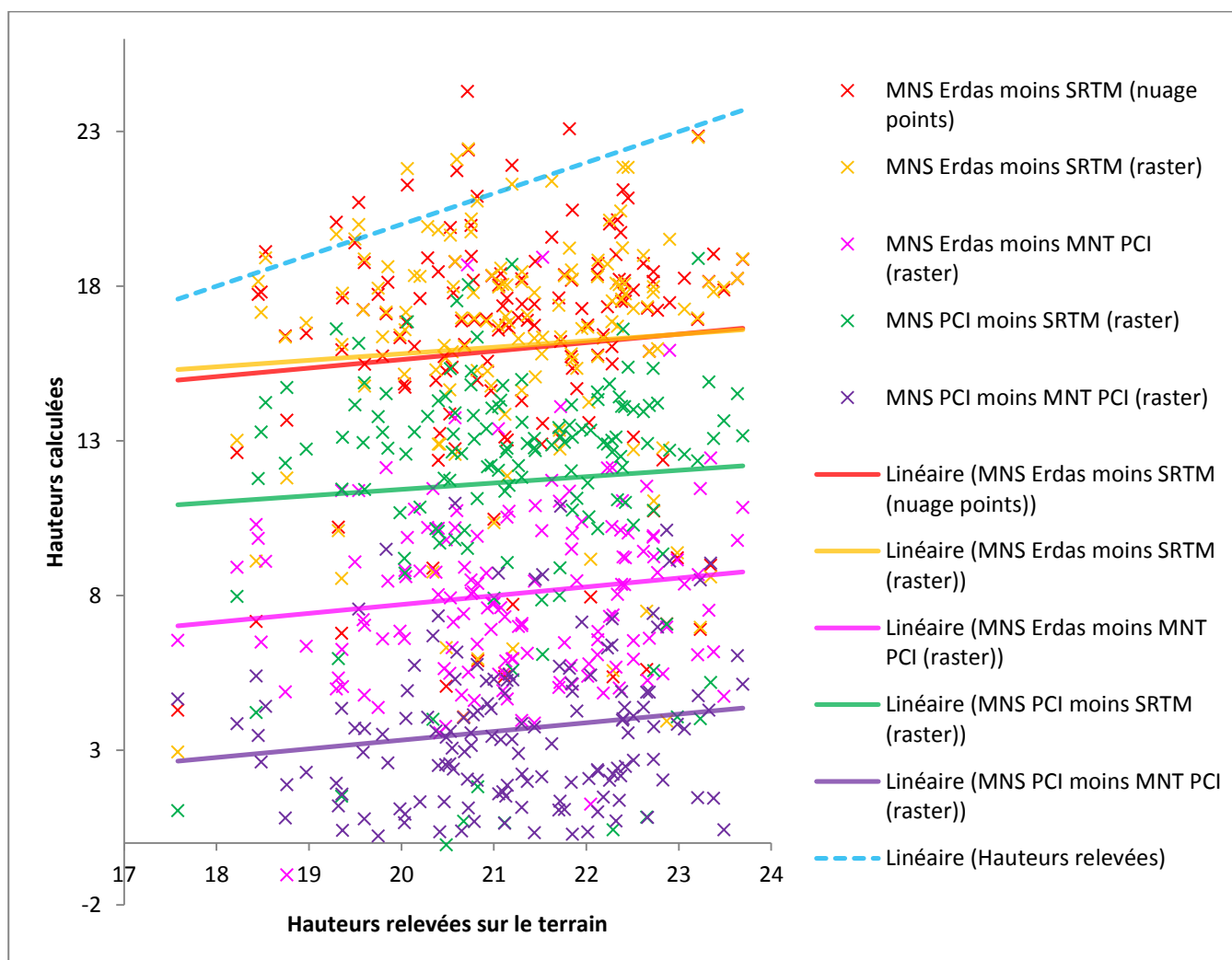
Divers MNT ont été produits à partir du MNS PCI avancé. Ils sont représentés en Annexe 8 sur la figure 21. Cependant, aucun d'entre eux n'est en mesure de réellement gérer la suppression des éléments du sursol. La suite des tests se base donc sur le MNT PCI produit à partir d'une fenêtre de 50 mètres, paramétrage ayant été utilisé pour Mayotte, pour rester cohérent avec les travaux effectués sur cette zone dans l'optique de comparaison.

Sur le MNT SRTM la marque des arbres composant la parcelle reste visible, donc lui non plus n'est pas en mesure de totalement supprimer le sursol.

Comparaison des résultats

La figure 22 et le tableau 7 permettent de visualiser les écarts existants entre les hauteurs calculées à partir des logiciels et les hauteurs relevées sur le terrain.

Figure 21 : Comparaison entre hauteurs moyennes calculées et hauteurs moyennes relevées au Brésil



Dans un premier temps on remarque qu'aucune courbe des hauteurs moyennes calculées ne se rapproche des hauteurs relevées donc réelles (courbe pointillée cyan). Toutes sous-estiment les hauteurs, et sont à peu près parallèles entre elles mais avec une pente très éloignée de celle des hauteurs réelles. Ces décalages systématiques semblent donc réfuter un biais lié à la donnée Pléiades ou à l'utilisation d'un logiciel en particulier. Ce décalage peut être dû au fait que contrairement aux données relevées qui renseignent l'intégralité des arbres des essais clonaux et uniquement des arbres, les MNS créés eux n'ont pas la capacité de reconnaître les éléments traités. Ainsi, les points corrélés des hauteurs calculées ne tomberont pas forcément sur des arbres et nous ne pouvons pas être certains que tous les arbres auront au moins un point les renseignant. Cette solution n'est pas aussi fiable qu'un relevé direct sur le terrain mais il ne faut pas pour autant la considérer comme inadéquate, d'autant plus qu'individuellement un certain nombre de points (notamment obtenus avec Erdas et le MNT SRTM) sont très proches de la réalité.

On remarque que les courbes issues du MNS Erdas restent de manière générale assez proches de la référence LiDAR contrairement aux courbes issues du MNS PCI qui elles ont tendance à sous-estimer les altitudes de manière importante. Il est aussi intéressant de voir que les deux courbes issues du MNS Erdas et du MNT SRTM sont très similaires malgré le fait que l'un des MNS soit issu du nuage de point corrélés et que l'autre se base sur le raster (qui inclut donc à la fois les points corrélés mais aussi les points interpolés). Cela signifie donc que l'opération d'interpolation n'apporte pas d'erreurs majeures au MNS.

Concernant les MNT, on remarque que le décalage entre les hauteurs calculées et les hauteurs relevées augmente toujours lorsque le MNT PCI est utilisé. Si les hauteurs calculées sont plus basses avec ce dernier,

c'est que ce MNT ne supprime quasiment pas la couverture végétale dense. De ce fait l'écart entre le MNS utilisé et le MNT PCI sera quasiment nul ce qui donnera des hauteurs calculées anormalement basses.

Tableau 7 : Statistiques des différences entre les hauteurs moyennes calculées et les hauteurs moyennes relevées

	MNH Erdas/SRTM (nuage points)	MNH Erdas/SRTM (raster)	MNH Erdas/PCI (raster)	MNH PCI/SRTM (raster)	MNH PCI/PCI (raster)
Moyenne des écarts aux hauteurs relevées (en mètres)	-5,25	-5,14	-13,15	-9,53	-17,54
Ecart-type des écarts aux hauteurs relevées (en mètres)	4,23	4,26	3,01	3,98	2,55
Coefficient de corrélation entre les hauteurs relevées et les hauteurs calculées	0,0854	0,0656	0,1276	0,0686	0,1505
Coefficient de détermination entre les hauteurs relevées et les hauteurs calculées	0,0073	0,0043	0,0163	0,0047	0,0227

Dans le tableau 7 on remarque que la moyenne des écarts de hauteur est plus faible pour les MNS Erdas, plus forte pour les MNS PCI. Dans l'étude sur Mayotte, Erdas avait déjà tendance à surestimer les altitudes par rapport à PCI. Cet écart viendrait donc d'une différence interne aux chaînes de traitement des logiciels.

Considérant les écarts-type des écarts de hauteur, ce sont les résultats issus du MNT PCI qui se rapprochent le plus de la référence. Si le MNT PCI est un raster quasiment identique aux MNS, il est normal que la plage des écarts de hauteur soit réduite. Dans ce cas le fait que les écarts-type soient faibles n'est pas forcément un signe de qualité. Les hauteurs issues du MNT PCI ne sont pas fiables car ce dernier ne parvient pas à supprimer la végétation. En revanche l'utilisation de MNT SRTM, qui représente plus grossièrement le relief, génère des écarts plus importants mais il est le seul à retirer un tant soit peu les éléments du sursol. Les hauteurs calculées sont donc déjà beaucoup plus proches de la réalité terrain comme le montre les résultats sur les moyennes des écarts.

Lors de la production des MNS sur la région d'Itatinga, nous avons constaté que sur certaines zones les hauteurs n'ont pas été calculées : le nuage de points n'est pas suffisamment dense. Après vérification, il semblerait que ces zones correspondent aux arbres ayant subi l'effet du vent durant le laps de temps séparant les 3 images Pléiades. En effet, comme la cime de ces eucalyptus s'est inclinée entre les 3 prises de vue, il est impossible pour un algorithme d'établir une corrélation sur ces points. L'un des inconvénients du principe de la tri-stéréoscopie est sa sensibilité aux variations inter-images due aux quelques secondes séparant les trois clichés. D'autres études avaient en effet identifié la présence d'artefacts au niveau des routes dus au déplacement des véhicules. C'est aussi en partie pour cette raison que la représentation des surfaces d'eau et de la couverture nuageuse est si mal gérée par la tri-stéréoscopie.

Concernant le recours à des données Pléiades pour estimer des hauteurs d'arbre dans la région d'Itatinga, il faut savoir que cette solution a été trois fois plus coûteuse que les relevés terrain directs. Cependant, il s'agit là d'un échantillon test réduit, groupé et accessible. Si les parcelles avaient été isolées, difficiles d'accès ou gigantesques, les relevés terrain auraient été bien plus coûteux. Il faut aussi rappeler que cette technologie est encore récente.

Conclusion et perspectives

Conclusion sur les résultats

En 2010, le projet de typologie des espaces boisés de Mayotte a abouti à la production d'une carte de la végétation de l'île qui prend en compte la hauteur de la végétation et sa structure. Cette carte était basée sur l'exploitation de données LiDAR aériennes à très haute résolution spatiale. Les données sur la hauteur de la végétation apportent une information précieuse dans des contextes tropicaux de type agroforestiers afin de distinguer les différents types de zones boisées. Les équipes du Cirad travaillent sur des terrains de l'hémisphère sud. Dans ces zones et notamment en Afrique, les données sont peu nombreuses et les acquisitions LiDAR sont difficiles à réaliser.

Le but de ce stage était d'identifier une solution alternative aux données LiDAR pour la production de Modèles Numériques de Surface (MNS), de Modèles Numériques de Terrain (MNT) et de Modèles Numériques de Hauteur (MNH), basées sur des données tri-stéréoscopiques Pléiades. Ce type de données étant plus facile à obtenir.

Ces travaux ont été effectués d'une part sur l'île de Mayotte puisque nous disposons sur ce territoire d'un jeu de données complet (LiDAR et orthophoto notamment) qui nous a permis de comparer les données produites avec des données fiables. Malheureusement, les données LiDAR ont été acquises 5 ans avant l'image Pléiades. Il y a donc une part d'incertitude pour ce qui concerne la validation de la hauteur des arbres. Nous avons donc également travaillé sur une autre zone d'étude au Brésil sur laquelle nous disposons de données de terrain sur la hauteur des plantations d'eucalyptus, acquises simultanément avec l'image satellite.

Pour créer les produits issus de l'image Pléiades, nous avons été amenés à tester différents logiciels afin de déterminer celui qui serait le plus performant. Nous avons ainsi testé Erdas Imagine, ENVI, PCI Geomatics et ASP (Ames Stereo Pipeline). Un comparatif sur ces logiciels est disponible en Annexe 3.

Parmi ces logiciels, seul PCI Geomatics dispose d'un outil permettant de dériver un MNT à partir d'un MNS. Nous avons donc aussi utilisé le MNT SRTM pour la production de MNH. En effet, la plupart du temps il s'agit de la seule information dont nous disposons (en Afrique notamment).

Pour ce qui est de l'estimation générale des hauteurs sur un territoire comme Mayotte, l'utilisation d'un MNH issu d'un MNS et d'un MNT calculé avec PCI semble être une solution adéquate. Cependant, les tests sur Mayotte et les parcelles au Brésil ont clairement montré qu'il vaut mieux envisager l'utilisation d'un MNH issu d'un MNS calculé avec Erdas et du MNT SRTM lorsque l'étude porte spécifiquement sur des formations végétales denses et inclut l'estimation de hauteurs d'arbres.

PCI est toutefois très intéressant puisqu'il permet d'obtenir un MNT plus cohérent avec les MNS utilisés, pour une estimation plus fine des hauteurs. Malheureusement, les MNT calculés avec PCI ne sont pas en mesure de remplir leur tâche, à savoir supprimer l'intégralité des éléments du sursol, et ne peuvent donc pas être considérés comme fiables dans une étude s'appliquant à des formations forestières denses.

Finalement, aucun des produits obtenus durant ce stage n'atteint le niveau de qualité des données issues du LiDAR, mais peuvent servir de base pour l'identification et la classification des espaces boisés et agro-forestiers.

Perspectives

Une piste d'amélioration qui n'a pas été développée au cours de cette étude reste possible. Elle consiste à combiner plusieurs MNH. En effet, le MNH issu du MNS et du MNT PCI est assez bon en ce qui concerne la représentation générale des hauteurs de Mayotte. Par contre pour les espaces de végétation dense, ce MNH ne remplit pas son rôle. En revanche, le MNH issu du MNS Erdas et du MNT SRTM est lui en mesure de représenter ces espaces de manière convenable.

On pourrait donc envisager de créer un MNH issu de la combinaison des deux MNH cités précédemment. Ce travail serait alors réalisé soit à l'aide d'une classification d'image soit par digitalisation. Le MNH issu du MNT SRTM serait conservé pour les zones de végétation dense et le MNH issu de PCI serait conservé pour le reste. Mais cette solution implique de posséder à la fois Erdas et PCI.

Il serait également intéressant de tester d'améliorer les résultats de la stéréoscopie par corrélation. En effet, selon Devernay et Devade (1999), « *Les défauts majeurs de la stéréo par corrélation sont de mal restituer (a) les surfaces présentant des réflexions spéculaires, (b) les surfaces trop faiblement contrastées, (c) les surfaces de pente trop forte, et (d) les discontinuités de profondeur. Pour la restitution de milieux urbains à partir de photographies aériennes, ce sont surtout les défauts (b) et (d) qui dominent: les objets «bavent» hors de leur limite, notamment à cause des fortes différences de contraste entre l'arrière-plan (le sol, qui est souvent à l'ombre) et le premier plan (toits, végétation, etc.), ce qui est gênant pour certaines applications.* ». Notre problématique ne s'applique ni à des photographies aériennes ni à l'espace urbain, mais ce phénomène d'objets « bavant » hors de leurs limites a été observé sur nos MNS produits. Cet élément est d'ailleurs l'un des critères qui sépare nos productions de la référence LiDAR qui, elle, possède des objets bien délimités.

Néanmoins, en passant par une **corrélation par fenêtres adaptatives** [Kanade et Okutomi, 1994], comme le suggèrent Devernay et Devade (1999), il serait possible d'améliorer la qualité de nos MNS tri-stéréoscopiques. Cette option reste à être testée et confirmée.

Bibliographie

- A.-L. BEAULANT, 2003, « Elaboration de Modèles Numériques de Surface et de Terrain en Zone rurale fortement aménagée à partir de données LiDAR », Mémoire interne à Cemagref réalisé pour l'obtention du Diplôme d'études approfondies en méthodes physiques en télédétection, pp. 46.
- C. CAUVIN, F. ESCOBAR et A. SERRADJ, 2008, « Cartographie thématique 4 « Des transformations renouvelées » », Collection « SInformation Géographique et aménagement du Territoire », Editions Hermès Sciences, Lavoisier-Paris, Vol.4, pp. 450.
- R. CRESSON, 2014, « Évaluation de la qualité des modèles numériques de terrain générés avec le pipeline ASP (Ames Stereo Pipeline) à partir d'images Pléiades stéréo », rapport interne TETIS, pp. 35.
- F. DEVERNAY et J. DEVADE, 1999, « Correction et amélioration des résultats de la stéréoscopie par corrélation : application au MNE urbain », Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, pp. 3.
- S. DUPUY, G. LAINE, J. TASSIN et J.-M. SARRAILH, 2013, « Characterization of the horizontal structure of the tropical forest canopy using-based LiDAR and multispectral image analysis », International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 25 (2013), 76–86, pp. 11.
- S. DUPUY, G. LAINE, T. TORMOS, 2012, « OBIA for Combining LiDAR and multispectral data to characterize forested areas and land cover in tropical region », proceedings of the 4th GEOBIA, May 7-9, 2012 - Rio de Janeiro - Brazil. p.279.
- M. ETTARID, H. HADFAT, A. ZAZA, A. KHALDI, 2004, « Qualité des modèles numériques de terrain dérivés par corrélation automatique », Département de Cartographie et de Photogrammétrie – Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, pp. 6.
- C. S. FRASER, G. DIAL, J. GRODECKI, 2005, « Sensor orientation via RPCs », ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 60 (2006), 182-194, pp. 13.
- C. GUERIN, 2014, « Génération de Modèles Numériques de Surface et Détection de Changements 3D à Partir d'Imagerie Satellite Stéréoscopique Très Haute Résolution », Thèse de doctorat de l'Université Paris Descartes, Spécialité : Informatique, Ecole doctorale Informatique, Télécommunications et Electronique (Paris), pp. 152.
- T. Kanade et M. Okutomi, 1994, « A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment », IEEE Trans.PAMI, 16(9):920–932, pp. 8.
- G. LAINE, DUPUY, S., TASSIN, J. et SARRAILH, J. M., 2010, « Etude de la Typologie Forestière de Mayotte », Agrifor Consult - Cirad, Montpellier, France, pp. 220.
- G. LE MAIRE, S. DUPUY, Y. NOUVELLON, R. ARAUJO LOOS et R. HAKAMADA, 2014, « Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil », Remote Sensing of Environment, 152, 136-149, pp. 13.
- J.-M. MOREL (CMLA), «3D Session Introduction», présentation orale, Pléiades' Days (1-3 avril 2014), Toulouse
- J.-M. DELVIT (CNES) et C. LHELQUEN (CNES), «Pléiades 3D», présentation orale, Pléiades' Days (1-3 avril 2014), Toulouse

Annexes

Annexe 1 : Compléments sémantiques

Définitions diverses

LiDAR : de l'anglais « **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging ». Selon Beaulant (2003), c'est « un système actif d'interférométrie à partir de la lumière émise par un laser. Il s'agit d'un télémètre laser aéroporté qui par le système TopoSys se compose de deux blocs de fibres optiques (émission et réception). La position des objets est déterminée par mesure du temps de trajet de la lumière. Ces objets sont repositionnés dans l'espace des X, Y grâce à l'utilisation d'un GPS différentiel et d'une plateforme inertielle ». C'est un principe similaire aux RaDAR « **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging » et au SoNAR « **S**ound **N**avigation **A**nd **R**anging » qui, eux, se basent respectivement sur des ondes électromagnétiques et le son.

GCP (Ground Control Point) : point de localisation à la surface de la Terre connu dans un système de projection établi. Utilisé pour améliorer la précision spatiale de l'ensemble des autres points auxquels ils sont associés. Ils permettent de géoréférencer des images de télédétection ou des cartes numérisées (<http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary>)

Tie-points (points homologues) : point dans une image numérique ou une photographie aérienne qui représente la même localisation sur une image adjacente ou une autre photographie aérienne. Généralement exprimés comme une paire, les tie-points peuvent être utilisés pour lier des images et créer des mosaïques (<http://www.esrifrance.fr>)

RPC (Rational Polynomial Coefficients) : Selon Fraser et al. (2005) c'est « un modèle d'orientation de capteur alternatif pour les images satellite à très haute résolution (THRS). Il permet de passer de coordonnées images à des coordonnées spatiales définies dans un système de référence géographique. »

Images épipolaires : couples stéréo dans lesquels l'image de gauche et de droite sont orientées de manière à ce que les points au sol aient les mêmes coordonnées en Y sur les deux images. Elles permettent d'accélérer grandement la vitesse de la mise en correspondance entre les images ainsi que l'exactitude des résultats de cette correspondance.

Rapport B/H

Le rapport B/H est une information renseignant les conditions d'acquisition d'images satellite multi-stéréoscopiques. Ce rapport se base sur la comparaison entre la distance parcourue par le satellite entre deux prises (B) et l'altitude à laquelle se trouve ce satellite (H).

Les métadonnées des images Pléiades ont permis de récupérer les positions géographiques du satellite à chaque prise de vue. A partir de ces informations les distances séparant chaque prise de vue ont pu être déduites. L'altitude du satellite Pléiades-HR a été récupérée sur le site officiel du CNES (<http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr>). A partir de là le rapport B/H de nos images Pléiades a été calculé :

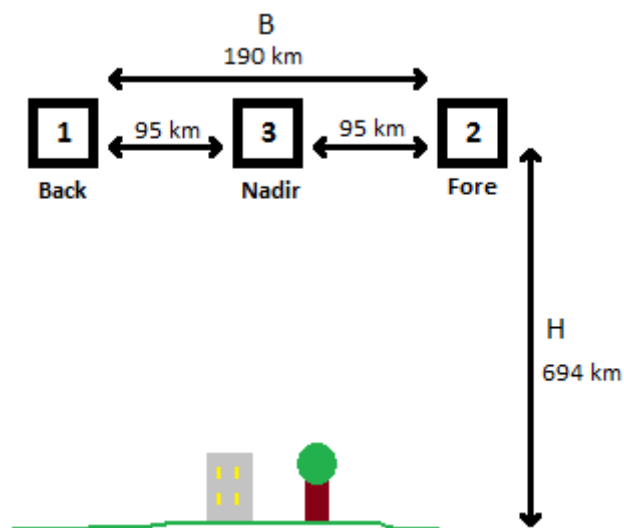
- Rapport B/H entre les satellites Backward (Foreward) et Nadir : $95 \text{ km} / 694 \text{ km} = 0.1369$
- Rapport B/H entre les satellites Backward et Foreward : $190 \text{ km} / 694 \text{ km} = 0.2738$

D'après Morel (2014):

- un rapport B/H inférieur à 0,15 pour des images stéréoscopiques (écart entre Nadir et Back ou Nadir et Fore) correspond à une distance d'acquisition de 20 km
- un rapport B/H inférieur à 0,3 pour des images tri-stéréoscopiques (écart entre Back et Fore) correspond à une distance d'acquisition de 20 km

D'après Delvit et Helquen (2014), si un rapport B/H entre des images stéréoscopiques est compris entre 0,10 et 0,15 (ce qui est notre cas), ces images Pléiades permettent une bonne identification des géométries.

Figure 22 : Calcul du rapport B/H pour les images Pléiades de Mayotte



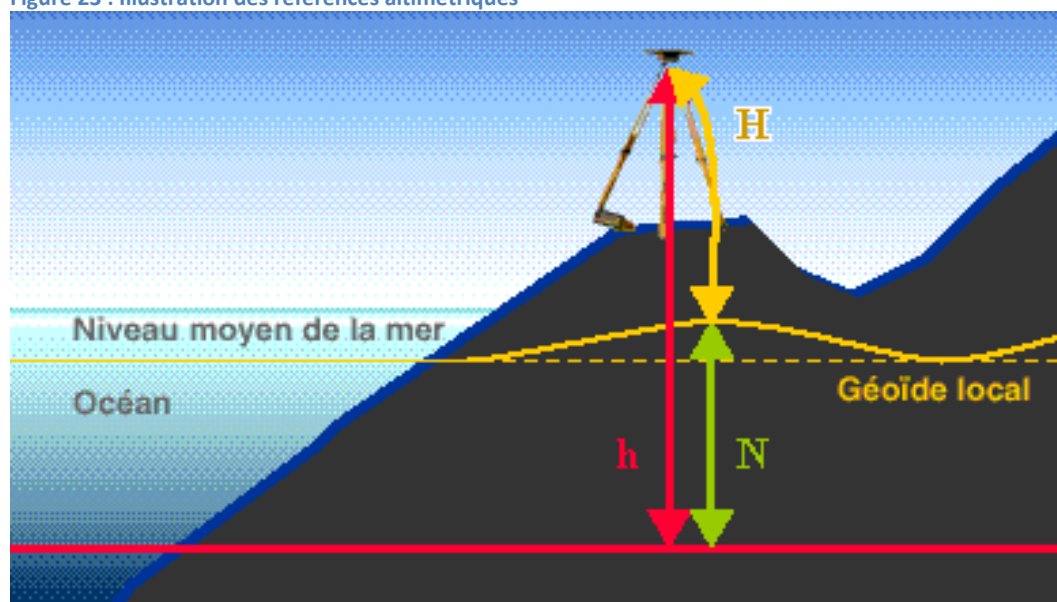
Références altimétriques

Lorsqu'elle est enregistrée, une information de hauteur doit être calée sur une référence (<http://www.ngi.be/FR/FR2-1-3.shtm>). On distingue alors (cf. Figure 23) :

- **La hauteur orthométrique: H** (déterminée par nivellement horizontal et gravimétrie)
- **La hauteur ellipsoïdale: h** (déterminée par GPS par rapport à un ellipsoïde de référence)
- **La hauteur géoïdale: N** (peut être déterminée à partir d'un géoïde global et affinée par des observations locales de la pesanteur Δg ; distance ellipsoïde/géoïde)

La conversion d'une hauteur ellipsoïdale h en altitude orthométrique H se calcule donc par $H = h - N$.

Figure 23 : Illustration des références altimétriques



Annexe 2 : Liste et origine des données utilisées au cours du stage

Tableau 8 : Données utilisées lors de l'étude

Espace géographique représenté	Type	Date d'acquisition	Fournisseur	Rôle dans le stage		Coût de la donnée
Mayotte	Images tri-stéréoscopiques Pléiades	11 avril 2013	CNES / Airbus DS	Base de la création des modèles numériques		Gratuit dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs
	MNT SRTM	2000	USGS / NASA (Shuttle Radar Topography Mission)	Base de la création des modèles numériques	Orthorectification des images Pléiades d'origine	Gratuit
	Orthophoto	2008	IGN / DAAF de Mayotte	Orthorectification des images Pléiades d'origine		Mis à disposition gratuitement par la DAAF de Mayotte dans le cadre du projet PNTS THRS3D
	MNS LiDAR	2008	IGN / DAAF de Mayotte	Juger la qualité des modèles numériques produits		Mis à disposition par la DAAF de Mayotte dans le cadre du projet PNTS THRS3D
	MNT LiDAR	2008	IGN / DAAF de Mayotte			
	MNH LiDAR	2008	Produit par S. Dupuy en 2008			
Région d'Itatinga Brésil	Images tri-stéréoscopiques Pléiades	4 mai 2014	Airbus DS	Base de la création des modèles numériques		3 X 3000€ = 9000€
	MNT SRTM	2000	USGS / NASA (Shuttle Radar Topography Mission)	Base de la création des modèles numériques	Orthorectification des images Pléiades d'origine	Gratuit
	Image Pléiades orthorectifiée	Mai 2014	Produit par G. Le Maire en 2014	Orthorectification des images Pléiades d'origine		Gratuit (dérivé d'une image Pléiades)
	Hauteurs d'eucalyptus relevées sur le terrain	Février – Mars 2014	Relevées à la main par l'IPEF dans le cadre du projet EUCFLUX	Juger la qualité des modèles numériques produits		3000€

Annexe 3 : Retour sur logiciels utilisés

Erreurs et limites rencontrées sur les logiciels

Erdas Imagine

A de nombreuses reprises il est arrivé que le module eATE d'Erdas plante au cours de son utilisation et cela notamment lorsque des images volumineuses étaient insérées en entrée. Pour contourner cette limite nous avons été amenés à décomposer l'image en plus d'une trentaine de tuiles d'environ 16 km², et de produire le MNS sur chaque tuile avant de mosaïquer les produits résultants. Cela aura pris environ 3 semaines de travail.

ENVI

La qualité des MNS créés sous ENVI dépend beaucoup du paramètre « Terrain Detail ». Ce paramètre définit le nombre de niveaux de pyramides parcourus pour l'opération de corrélation. Le nombre maximal de niveaux pouvant être parcourus dépend de la taille des images en entrée. Pour les images Pléiades, ce paramètre pouvait théoriquement être renseigné jusqu'au niveau 9. Cependant, à chaque fois que l'opération « DEM Extraction Wizard » a été lancée avec ce paramètre au niveau 9, l'opération était interrompue avant la fin. Ce problème a été communiqué au support technique du logiciel, qui a tenté de trouver une solution en se basant sur le même jeu de données, sans succès. Nous avons donc été obligés de réduire la taille des images en entrée et d'utiliser des blocs d'environ 4 km². Dès lors, le niveau 5 était le maximum possible pour le paramètre « Terrain Detail » avec cette dimension d'images.

Mais l'utilisation de blocs a eu pour conséquence directe de présenter une limite du logiciel. En effet, lors de l'utilisation de « DEM Extraction Wizard » la sélection de l'étendue des images traitée pour la création du MNS est réalisée avant la création des GCP et des tie-points (contrairement à Erdas pour lequel on crée d'abord nos GCP et nos tie-points sur les images intégrales et par la suite on définit l'étendue des tuiles que l'on crée). Au final, nous étions obligés de recréer des GCP et des tie-points pour chaque portion de MNS créée sous ENVI. Ceci est problématique car il n'est pas facile d'identifier suffisamment de points dans une zone restreinte. De plus il faut rappeler que pour une même tuile nous étions obligés de créer 3 MNS distincts pour chaque couple stéréoscopique possible. Cela augmente drastiquement le temps de création d'un MNS recouvrant l'île de Mayotte dans son intégralité. Le fait que nous ne possédions l'extension « DEM Extraction Wizard » que pour un temps limité à 1 mois a rendu la création d'un MNS complet impossible. C'est pour cela que le logiciel ENVI a rapidement été écarté.

ASP

Les traitements ont été réalisés par un collègue de l'équipe Rémi Cresson. Dans le rapport qu'il a rédigé, (Cresson 2014), il rapporte que les paramètres sélectionnés pour la création d'un MNS sous le logiciel ASP n'étaient pas forcément les plus optimaux. Il est donc possible d'améliorer les résultats obtenus sous ASP en sélectionnant des paramètres plus appropriés dans une étude future.

PCI Geomatica

Le logiciel PCI se base sur des paires épipolaires pour générer un MNS. Le logiciel donne la possibilité de créer une paire pour chaque couple possible (3 paires épipolaires) mais il est aussi proposé d'inverser les rôles de « maître » et « d'esclave » afin de créer 6 paires épipolaires.

L'opération de création d'un MNS basé sur 6 paires épipolaires a été tentée mais malheureusement celle-ci a échoué à chaque tentative dès lors qu'elle devait traiter une paire dont l'équivalent inversé avait déjà été traité. N'étant pas en mesure d'expliquer ce problème, nous avons été obligés de nous contenter des MNS créés à partir de 3 images épipolaires.

Comparaison des logiciels

Chacun des logiciels utilisés au cours de ce stage possèdent leurs atouts et leurs défauts. Le tableau qui suit permet de faire une comparaison entre eux, basée sur des critères qualitatifs et quantitatifs.

Tableau 9 : Comparaison des logiciels utilisés

Logiciel	Type de logiciel	Dimension des images insérées	Quantité d'images incluses dans l'opération	Temps de calcul	Résolution maximale du MNS
Erdas Imagine	Logiciel commercial	16 km ²	3 (tristéréoscopie) + inversion des rôles "maître"/"esclave" = 6 paires épipolaires	6 heures/portion de 16 km ² ; temps total = 3 semaines	0,50 mètre
ENVI	Logiciel commercial	4 km ²	2 (stéréo)	2 heures/portion de 4 km ²	0,50 mètre
Ames Stereo Pipeline (ASP)	Logiciel libre	intégralité des images Pléiades = 596 km ²	2 (stéréo)	2 jours par couple stéréoscopique ; temps total = 6 jours	0,50 mètre
PCI Geomatics	Logiciel commercial	intégralité des images Pléiades = 596 km ²	3 (tri-stéréo)	1 semaine	1 mètre (selon les conseils de l'aide en ligne)

Toutefois, Erdas est le seul logiciel commercial dont le poste sur lequel a été réalisé ce stage pouvait avoir accès à une licence de manière permanente. De ce fait, le nombre de tests réalisés sur celui-ci est bien plus important que pour les autres logiciels payants. Il se peut que cela ait joué sur la qualité des meilleurs résultats obtenus avec Erdas.

Annexe 4 : Paramétrages des outils logiciels

Tableau 10 : Stratégie d'extraction utilisée sous Erdas

MNS selon les paramètres de base du logiciel : **vert** ; MNS selon des paramétrages avancés : **rouge**

	Paramètre	Effet	Valeur utilisée	Justification
Correlation	Correlator	Choix de la stratégie de corrélation adoptée	NCC	Calcule la similarité entre 2 points sur 2 images différentes afin d'en faire des points corrélés. Allonge le temps d'exécution mais donne un meilleur rendu.
	Window Size¹	Définit la taille de la fenêtre de recherche (en nombre de pixels) pour l'opération de corrélation. Si un point homologue au point A n'est pas repéré dans une fenêtre de x pixels autour de A alors la corrélation est abandonnée	9 / 5	La valeur par défaut pour ce paramètre est de 9. Une fenêtre de 9x9 pixels permet de garantir un grand nombre de corrélations mais il se peut que certaines soient erronées. Avec une fenêtre de 5x5 pixels le nombre de corrélations est réduit mais celles qui sont réalisées sont plus fiables. Une petite fenêtre limite les distorsions géométriques et améliore les chances de correspondances.
	Coefficient Start	L'opération de corrélation parcourt tous les niveaux de pyramide avec à chaque fois un coefficient de corrélation différents. Un couple de points corrélés ne sera retenu que si le coefficient de corrélation atteint le seuil défini. Les corrélations retenues seront donc éliminées au fur et à mesure que l'opération atteint les derniers niveaux de la pyramide jusqu'au dernier niveau où seules les meilleures corrélations seront retenues.	0,3 / 0,7	En utilisant une gamme de corrélation basse proposée par défaut (0.3–0.8) cela augmente le nombre de points corrélés mais on risque d'avoir des associations fausses. Une gamme de coefficients hauts (0.7–0.8) donnera une meilleure précision, cependant un nombre plus faible de points seront associés.
	Coefficient End	Le coefficient de départ est utilisé sur le niveau de pyramide le plus élevé puis pour chaque sous-niveau qui suit le coefficient augmente de manière égale jusqu'à atteindre le dernier niveau pour lequel on utilisera le coefficient de fin	0,8	
Interpolation	Interpolation	Algorithme d'interpolation utilisé	spike	Algorithme de moyennes pondérées dont l'interpolation est contrainte par les régions segmentées identifiées sur l'image maîtresse. Les points identifiés comme des pics sont supprimés. Renforce les bordures du bâti
	Point Threshold	Déterminer le nombre de points considérés pour l'interpolation	5	Valeur par défaut. Permet de concentrer l'interpolation sur les quelques points entourant le point à interpoler. Un nombre faible permet de faire ressortir les spécificités du relief à grande échelle
	Search Window	Taille maximum de la zone de recherche (en pixels) autour du point à interpoler	50 / 70	50 est la valeur par défaut. Permet d'avoir une répartition assez uniforme des points tout en réduisant la quantité de points erronés. Une valeur de 70, augmente le nombre de points pris en considération lors de l'interpolation lorsque le point à interpoler se trouve isolé des points corrélés (sols à plat par exemple)

¹ Ce paramétrage est l'un de ceux sur lesquels la qualité du rendu va le plus se jouer: «La taille de la fenêtre de corrélation reste un paramètre logiciel critique, qui dépend de la texture de l'image et du relief.» (Ettarid et al, 2004)

	Blunder Type	Méthode du moindre carré plane adaptée aux interpolations de type "Region" ou "Spike"	PCA	Unique valeur disponible
	Std Dev Tolerance	Tolérance de déviation standard (en mètres) associée au "Blunder Type". Détermine la déviation standard de la forme planaire	3,0	Valeur par défaut
	LSQ Refinement	Définit le niveau de la pyramide auquel on applique un raffinement des moindres carrés. Algorithme qui utilise les moindres carrés pour affiner la corrélation afin d'améliorer les résultats subpixelaires	2 / 0	La valeur par défaut est 2. Utilisé sur le dernier niveau de la pyramide (niveau 0), ce paramètre peut nettement améliorer les résultats mais aussi augmenter le temps d'exécution.
	Edge Constraint	Nombre de niveaux de pyramide auquel on applique des contraintes sur les bordures. L'opération démarre au niveau 0 puis va à reculons un nombre de fois égal au nombre en entrée. Permet d'accentuer les limites des bâtiments en augmentant la densité de points sur leurs bords. Cette opération permet d'assurer que l'interpolation et la mise en correspondance ne traversent pas les bordures	3 / 4	La valeur par défaut est 3. Il est conseillé de renseigner ce paramètre à 4 niveaux de pyramide pour les données en haute définition afin de réduire le nombre d'erreurs.
Matching	Reverse Matching	Etape supplémentaire à l'opération de correspondance par paire dans laquelle les rôles d'image maitresse et d'image esclave sont inversés et la correspondance est réitérée	Check	Augmente le nombre de points redondants afin d'assurer la viabilité des résultats
	Tolerance	Paramètre de tolérance (défini en pixel) accompagnant l'opération "Reverse Matching" utilisée afin d'accepter ou de rejeter un point	1	Valeur par défaut
Smoothing	Smoothing	Recherche des pics dans l'élévation et supprime les points qui leur sont associés dans le cas où cette variation d'élévation est extrême et soudaine. En général cela supprime les artefacts	Low	Lissage minimum utilisé pour réduire le nombre d'artefacts et limiter le bruit sans trop altérer les altitudes relevées sur le MNS
Other	Additional Parallax y	Ajoute un parallaxe en y pour les images satellite pour lesquelles cela est nécessaire. Augmente la zone de recherche perpendiculaire à la ligne épipolaire et augmente la charge de travail pour la mise en correspondance	0	Valeur par défaut, nous ne l'utilisons pas ici
	Low Contrast	Permet à l'algorithme de forcer des correspondances dans les zones qui auraient été ignorées	Check	Option adaptée aux zones forestières sur les images panchromatiques

Tableau 11 : Paramétrage des éléments de traitement sous Erdas

General	Stop at Pyramid Level	Niveau de la pyramide auquel l'opération de corrélation s'arrête	0	L'opération parcourt tous les niveaux de la pyramide. Produit un modèle de surface plus précis
	Image Space	Définit si on utilise l'espace de l'image ou l'espace du sol lors de la corrélation	Check	Valeur par défaut
	Point Sampling Density	Choix du cycle périodique de corrélation de pixels. Ce paramètre accélère le traitement en ne corrélant pas tous les pixels à tous les niveaux de pyramide	1	En corrélant tous les pixels on a un modèle de surface plus précis mais l'opération prend plus de temps
	Pixel Block Size	Durant le traitement le module eATE divise les images en blocs de pixels et traite chaque bloc séparément. Définit la taille (en nombre de pixels) des blocs	500 / 1000	La valeur par défaut est de 500. Une plus grande dimension de bloc augmente la consommation de mémoire mais accélérera le temps d'exécution. Adapté pour les systèmes aux ressources avancées.
	Fiducial Mark Offset	S'applique aux capteurs de cadre analogiques seulement. Décalage minimal entre les points repères et le contenu de l'image utilisée pour la mise en correspondance	0	Valeur par défaut
	Threads	Nombre de files de traitement distribuées pour ce processus eATE. Chaque file est affectée à un noyau de la machine	2	Le traitement eATE est optimisé pour deux files
	Most Nadir	Utiliser l'image Nadir en tant que image maîtresse et les autres images (forward et backward) en tant que images de référence	Check	Cela assure que la différence d'angle entre la Nadir et la Forward (/Backward) soit plus petite que la différence entre la Forward et la Backward. Réduit la distorsion lors de la mise en correspondance et ainsi améliore les résultats
Format	Internal Format	Choix du format utilisé pour les fichiers internes pour l'extraction du MNS	LAS	Valeur par défaut
	Maximum Points	Nombre maximum de points utilisés par bloc pour les étapes des processus internes intermédiaires	50 millions	Valeur par défaut (impossible à augmenter)
	RGB Encoding	Assigne 1 couleur à chaque point terrain du fichier .las	Check	Permet la visualisation rapide d'1 image 3D
Radiometry	Gradient Threshold	Mesure du contraste autour du pixel central de l'image maîtresse. A utiliser pour forcer la corrélation des points sur les zones de faible contraste. Ce paramètre détermine si oui ou non une corrélation est tentée	2,5 / 3,5	La valeur par défaut est de 2,5. Pour les images à grand contraste radiométrique, il est conseillé d'utiliser une valeur élevée car il y aura probablement beaucoup de bons points corrélés et il est inutile de prendre le risque d'avoir de mauvais points.
	Primary Processing Band	Désigne la bande utilisée pour la segmentation	1	image panchromatique = 1 seule bande
	Use all Spectral Data	Optimiser les correspondances pour les images multibandes durant la corrélation	Uncheck	image panchromatique = 1 seule bande
	Create a radiometric layer	Création d'1 couche supplémentaire utilisée pour la mise en correspondance. Cette couche est un histogramme pondéré des bandes utilisées	Uncheck	image panchromatique = 1 seule bande

Tableau 12 : Définition des préférences sous Erdas

Overlap	Minimum Rays	Nombre minimum d'images utilisées pour la mise en correspondance	2	Configuration adaptée pour l'appariement de 3 images et par conséquent la tri-stéréoscopie.
	Maximum Rays	Nombre maximum d'images utilisées pour la mise en correspondance	3	L'algorithme fait correspondre les points 1 et 2, puis les points 2 et 3
	Percentage for Pair	Pourcentage de recouvrement requis pour les images utilisées pour les correspondances par paires	50	Valeur recommandée afin d'ignorer les paires avec trop peu de recouvrement
	Percentage for Triplet	Pourcentage de recouvrement requis pour les images utilisées pour les correspondances par triplet	30	Valeur recommandée afin d'ignorer les paires avec trop peu de recouvrement

Tableau 13 : Paramétrage des fichiers en sortie sous Erdas

General	Min Z	Valeurs minimum et maximum d'élévation utilisées pour restreindre l'opération de création du MNS. Toute valeur en dehors de cette gamme est retirée du fichier en sortie	-89	Valeurs par défaut provenant du MNS mondial
	Min Z		570,2	
	Bounding Box	Limite du cadre de sélection des données	Check	Limite la taille des images en entrée afin d'accélérer le temps d'exécution de l'opération et d'éviter le plantage du logiciel (événement survenu plusieurs fois)
	Subdivide	Génère de multiple éléments de traitement en subdivisant les images en entrée	1	Aucune subdivision utilisée afin d'éviter un plantage du logiciel (événement survenu plusieurs fois)
	Overlap	Pourcentage de recouvrement entre les zones subdivisées (uniquement si on choisit de subdiviser les images en entrée)	5	Valeur par défaut
Output files	Output Points in Raster Format	Créer un MNS au format .img ou .tif	Check	Correspond au format "raster" que l'on recherche
	Cell Size X/Y	Dimension des cellules et unité utilisée pour le raster en sortie	0,50 mètres	Dimension correspondant aux images Pléiades panchromatique en entrée
Split	Divide by Block Size	Divise le MNS en sortie en blocs d'une dimension définie	Check	Rend les fichiers en sortie plus faciles à gérer (vitesse de traitement, mémoire disponible)
	X/Y	Dimension des blocs (l'unité dépend de la projection)	1000 mètres	Crée des blocs d'1 km² (valeur parlante)
	Overlap	Pourcentage de recouvrement entre deux blocs adjacents	5	Préserver une continuité entre les bordures de chaque bloc sur le MNS en sortie
	Max Points Per Block	Nombre maximum de points créés par bloc dans les fichiers "vecteur" intermédiaires	50 millions	Valeur par défaut. Impossible à augmenter

Tableau 14 : Paramétrage d'extraction du MNS sous ENVI

Projection	Proj: UTM Zone 38 South Datum: WGS 84
Résolution	0,50 mètres

Paramètre	Effet	Valeur utilisée	Justification
Minimum Correlation	Seuil minimum nécessaire à atteindre pour retenir une corrélation	0,7	Ratio équilibré entre la précision du résultat et le nombre de correspondances retenues
Edge Trimming	Pourcentage de bordure découpé sur le MNS en sortie	0	La zone test n'est pas située à proximité des bordures
Moving Window Size	Taille de la fenêtre utilisée pour la recherche des points à corréler	5 x 5	Une fenêtre modérée permet d'avoir des correspondances précises tout en gardant un rendement fiable
Terrain Relief	Type de relief adapté au MNS produit	Moderate	Conserver un lissage minimum pour diminuer la présence de bruit
Terrain Detail	Définit le nombre de niveaux de pyramide utilisés durant la mise en correspondance des images. Le nombre maximal varie en fonction de la taille des images en entrée	Level 5 (Max)	La recherche de corrélations va s'effectuer jusqu'au dernier niveau de la pyramide. Cela permet d'avoir un résultat le plus précis possible

Tableau 15 : Paramétrage de la fusion des MNS résultants sous Erdas

Paramètre	Effet	Valeur utilisée	Justification
Filter Points (X et Y Spacing)	Réduire le nombre de points redondants sur une zone couverte par 2 MNS	0,5	Un point est conservé pour chaque cellule du MNS

Tableau 16: Paramétrage de création du MNS sous le pipeline ASP

Paramètre ASP	Effet	Valeurs possibles	Valeur utilisée pour nos tests	Justification
Pré-alignement	Aligne les deux images	Sans; Epipolaire; Homographie	Epipolaire affine;	Temps de calcul diminué
Normalisation	Normalise la dynamique des images	Avec ; Sans	Sans	utilisation de toute la plage d'intensité
Filtre de prétraitement	Réduction du bruit, Rehaussement des contours	Sans; Filtre moyen soustractif; Laplacien de gaussienne	Laplacien	Robustesse [1],[2]
Gabarit du filtre de prétraitement	Plus la taille est grande, plus un effet de « lissage » apparaît, faisant ressortir les grosses structures	Valeur de la taille du noyau (en pixels)	1,4 pixels pour le Laplacien	
Métrique de la fonction de coût pour l'analyse de la déformation	Sélectionne la méthode de calcul permettant d'estimer le déplacement entre l'image A et l'image B	Différence absolue; Différence au carré; Fonction de corrélation	Fonction de corrélation	Métrique robuste
Taille du noyau pour l'analyse de la déformation	Fixe la taille de la fenêtre mobile qui permet d'estimer le déplacement de l'image A par rapport à l'image B	Valeur de la taille du noyau (en pixels).	21 x 21px	
Filtre de la carte de déformation (1)	Filtre la carte de déformation en fonction des valeurs de la fonction de coût et du déplacement	Sans; Ajustement de parabole; Fenêtre adaptative affine ; pondération bayésienne EM	Fenêtre adaptative affine, pondération bayésienne EM	Qualité du raffinement [3],[4]
Filtre de la carte de déformation (2)	Élimine les valeurs aberrantes de la carte de déformation	Taille de la fenêtre mobile, Seuil, nombre d'itération	Noyaux de 5x5 pixels, seuillage, 1 seule passe	

Tableau 17 : Paramétrage d'extraction du MNS sous PCI

MNS selon les paramètres de base du logiciel : **vert** ; MNS selon des paramétrages avancés : **rouge**

Paramètre	Effet	Valeur utilisée	Justification
Failure value	Valeur utilisée pour représenter les pixels erronés du MNS résultant	-100	Valeur par défaut
Background value	Valeur utilisée pour représenter les pixels "NoData" (en dehors de la zone de chevauchement des MNS extraits) du MNS résultant	-150	Valeur par défaut
DEM Detail	Détermine le niveau de précision du MNS résultant	HIGH / EXTRA HIGH	Par défaut « High » est sélectionné. L'opération de corrélation se fait alors sur tous les niveaux de résolution. En choisissant « Extra High », l'opération de corrélation se fait sur tous les niveaux de résolution jusqu'à aller au delà de la pleine résolution.
Terrain type	Type de terrain correspondant à la zone traitée	Hilly / Mountainous	Le paramètre par défaut « Hilly ». Il correspond à un relief modérément élevé. Mountainous correspond plus aux variations brutes de relief de Mayotte.
Fill holes	Interpolation des zones erronées. Se base sur l'algorithme "Distance Transform"	Check	Opération d'interpolation permettant de remplir les zones n'ayant pas été corrélées
Smoothing filter	Opération de filtrage des valeurs d'élévation obtenues par interpolation ("Fill holes")	Low	Filtre minimum employé pour réduire les artefacts et le bruit sans trop affecter la topographie. Ne modifie pas la valeur des points identifiés par corrélation
Wallis filter	Appliquer un filtre de Wallis sur les images épipolaires avant l'extraction du MNS	Check	Adapté aux zones ombragées tels que la végétation
Create score channel	Création d'un canal image additionnel représentant le score de corrélation pour chaque pixel du MNS. Ce score de corrélation permet d'identifier les pixels où la corrélation avec le sol est faible ou erronée	Uncheck / Check	Permet de visualiser spatialement les zones les mieux corrélées
Output option	Stratégie de détermination de la valeur de pixel conservée lors du chevauchement de 2 MNS	Use last value / Highest score	Par défaut "Use last value" est sélectionné. Il permet la conservation de la dernière valeur de pixel créée. Highest score permet la conservation de la valeur de pixel ayant le meilleur score de corrélation (selon "Score Channel").

Tableau 18 : Paramétrage de l'opération DSM2DTM

Paramètre	Effet	Valeur utilisée	Justification
Elevation failure value	Identifie les pixels dans le MNS qui doivent être gérés d'une manière spécifique. Les pixels ayant une valeur supérieure à la valeur spécifiée sont copiés dans le MNT en sortie mais sont ignorés du calcul	-100	Valeur intrinsèque au MNS en entrée
Background elevation value	Valeur utilisée pour renseigner les pixels qui ne possèdent pas de valeur d'élévation dans le MNS en entrée	-150	Valeur intrinsèque au MNS en entrée
Horizontal/Vertical tile size	Taille horizontale/verticale de la fenêtre de recherche utilisée pour identifier les valeurs minimales locales	20 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 500 mètres	La fenêtre doit être plus large que les éléments à retirer (arbres, bâti) sans pour autant trop affecter la topographie

Left tail trim (%)	Pourcentage de la bordure gauche de l'histogramme du MNS en entrée à couper. Supprime des valeurs aberrantes basses existant dans le MNS en entrée	2%	Nettoyer un minimum le MNS en entrée
---------------------------	--	----	--------------------------------------

Annexe 5 : Localisation des points tests sur les images de référence

Figure 24 : Répartition des points enregistrés dans la zone test de 4 km² située au Nord-Est de Mayotte pour comparaison avec les Modèles Numériques LiDAR de référence

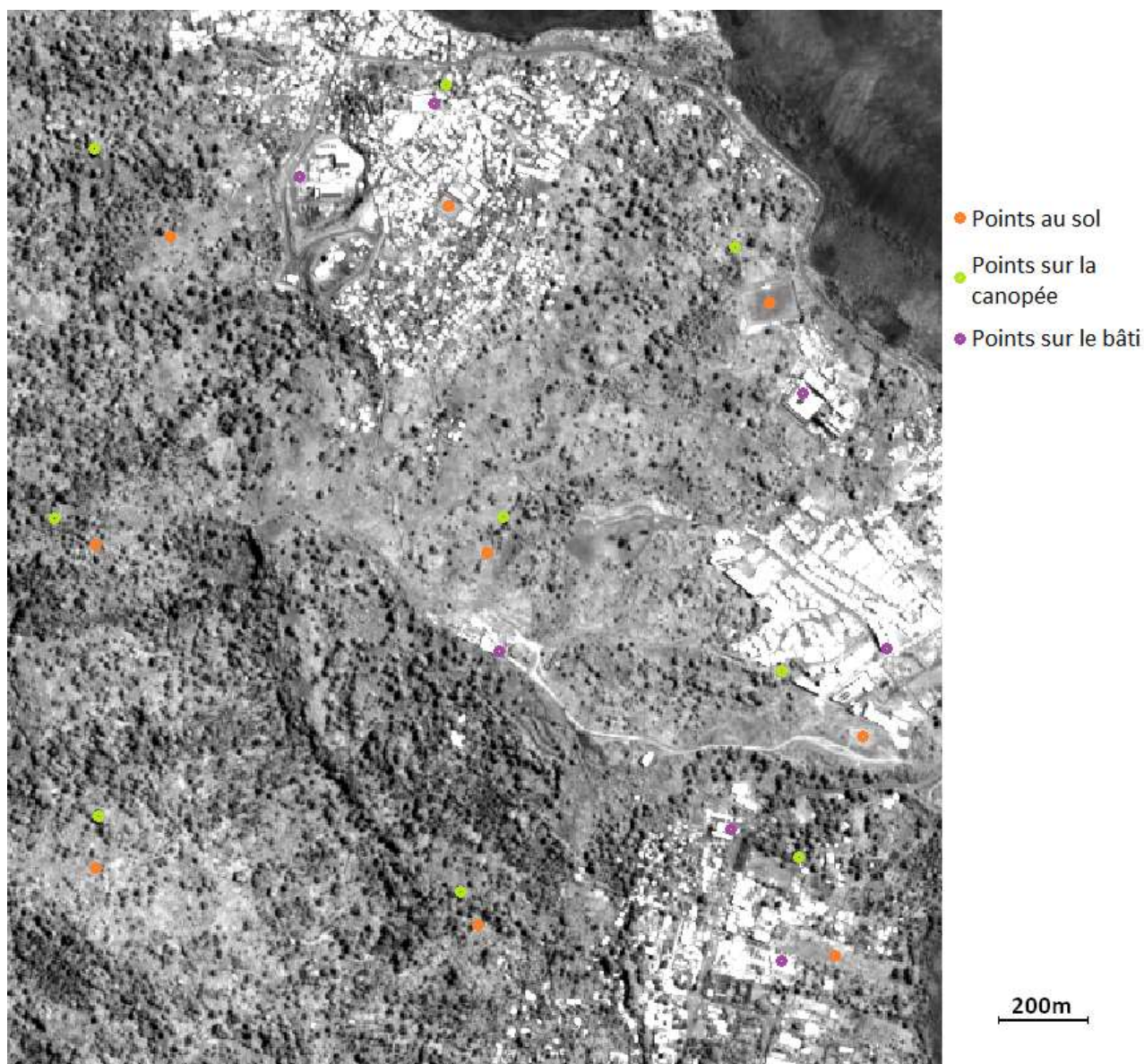
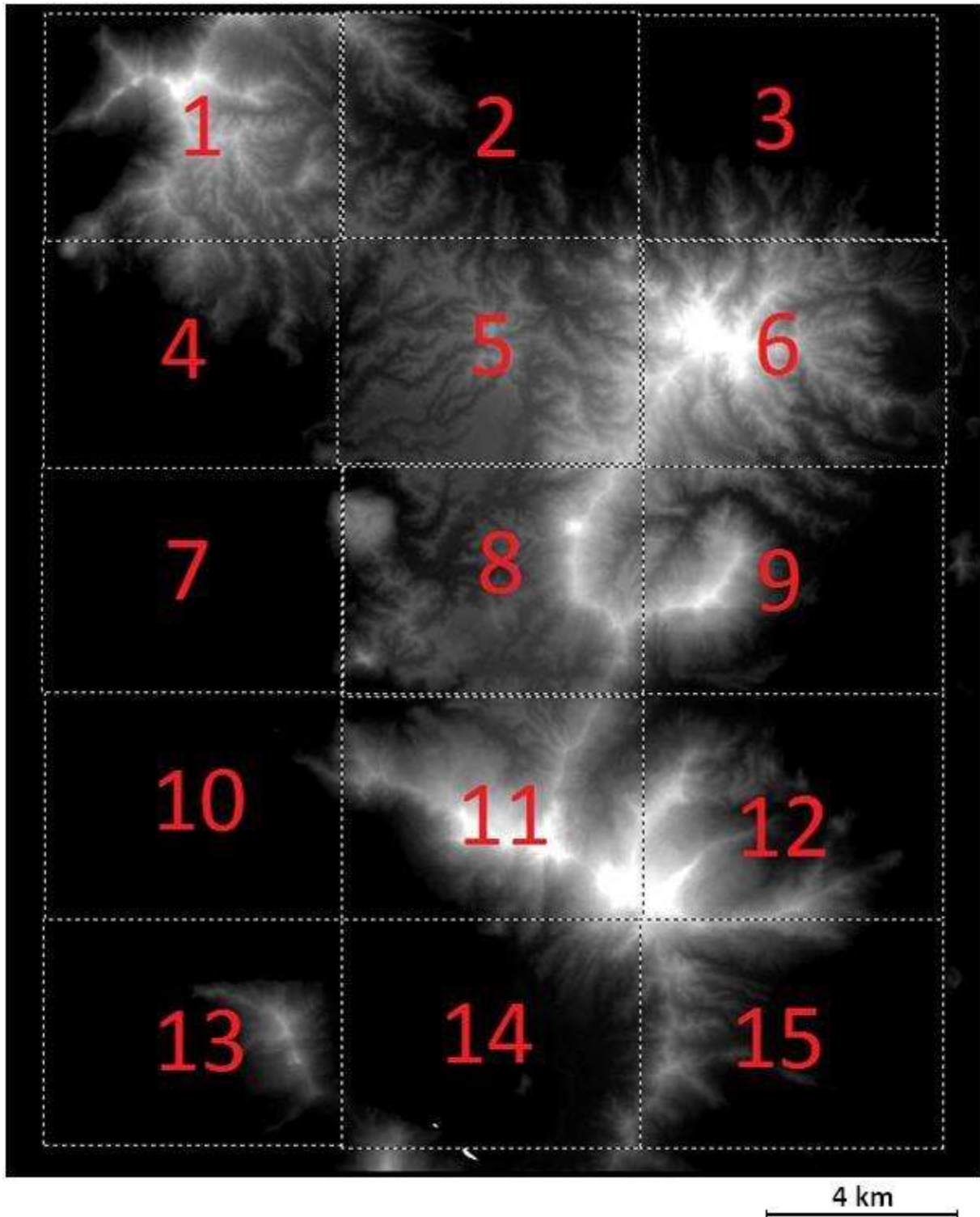
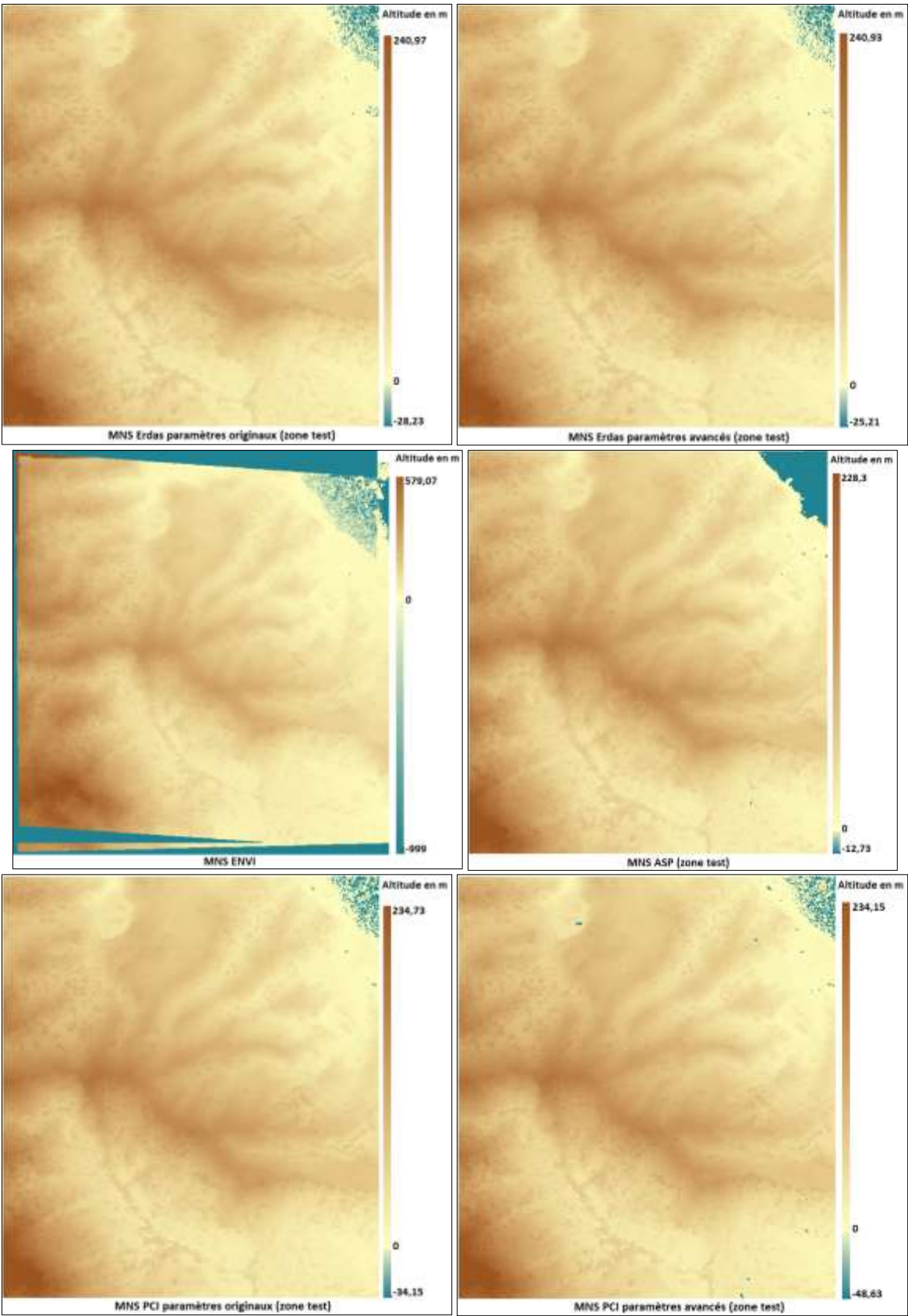


Figure 25 : Découpage de la zone d'étude en 15 portions dans chacune desquelles 1 point par type (sol, canopée, bâti) est relevé pour comparaison avec les Modèles Numériques LiDAR de référence



Annexe 6 : Représentation cartographique des Modèles Numériques obtenus sur l'île de Mayotte

Figure 26 : MNS produits sur une zone test de 4 km²



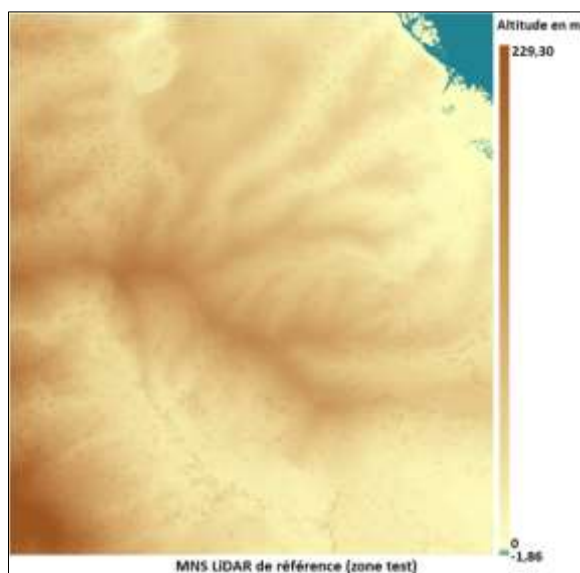
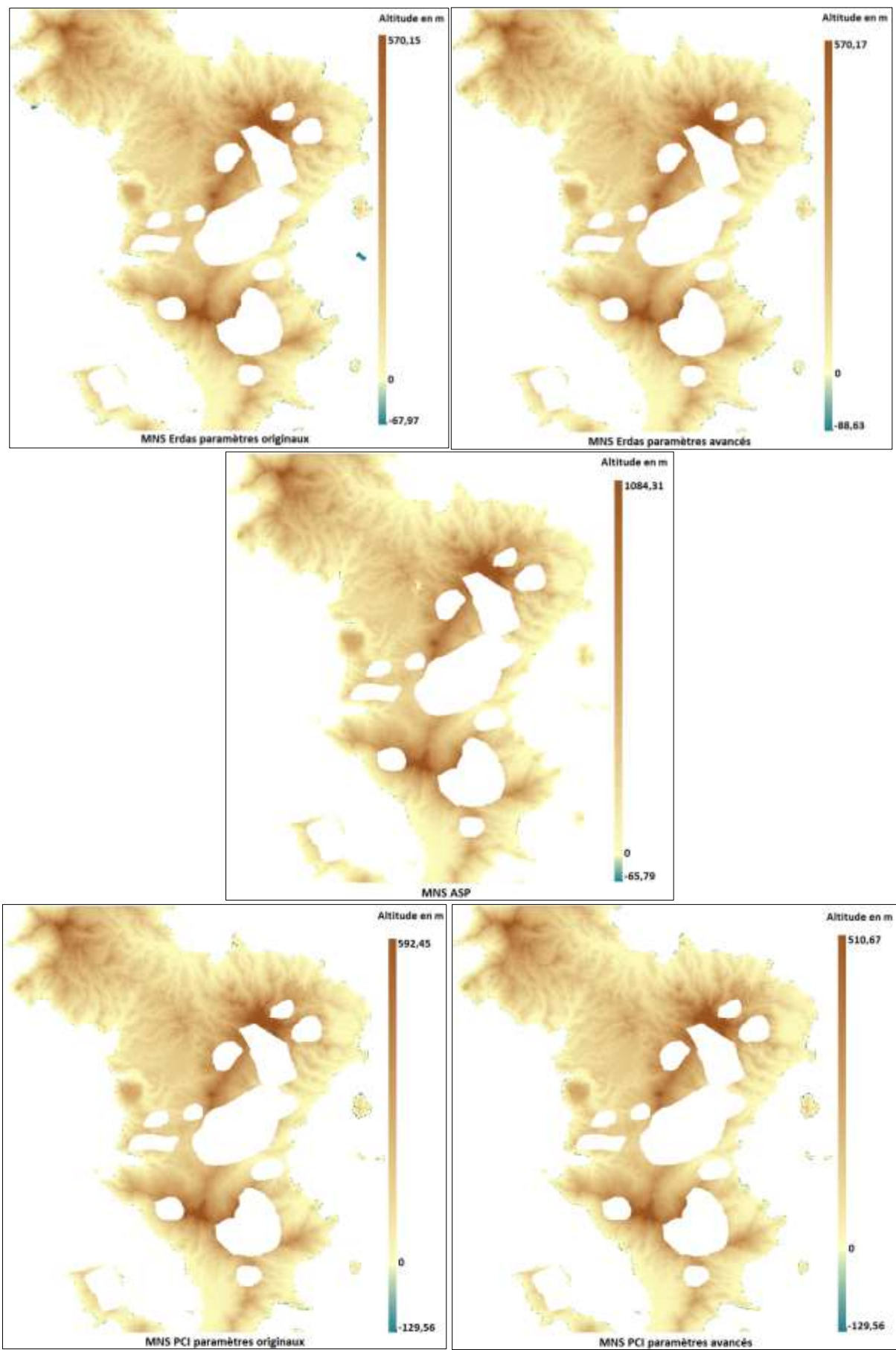


Figure 27 : MNS produits sur l'intégralité de la zone d'étude



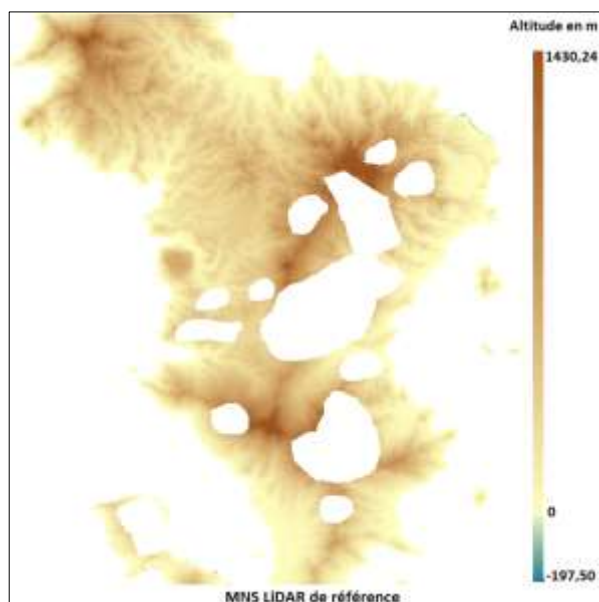
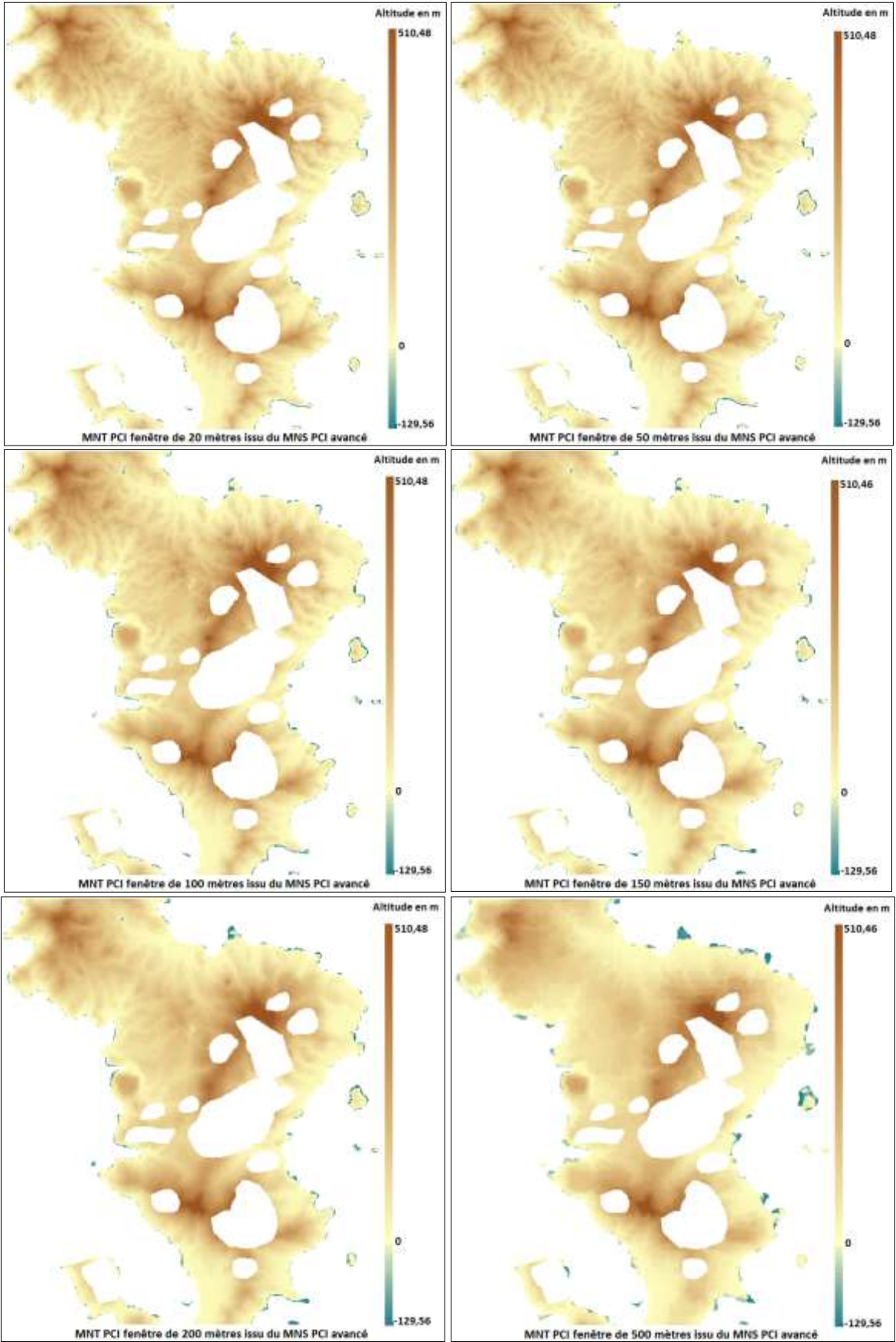


Figure 28 : MNT produits sur l'intégralité de la zone d'étude



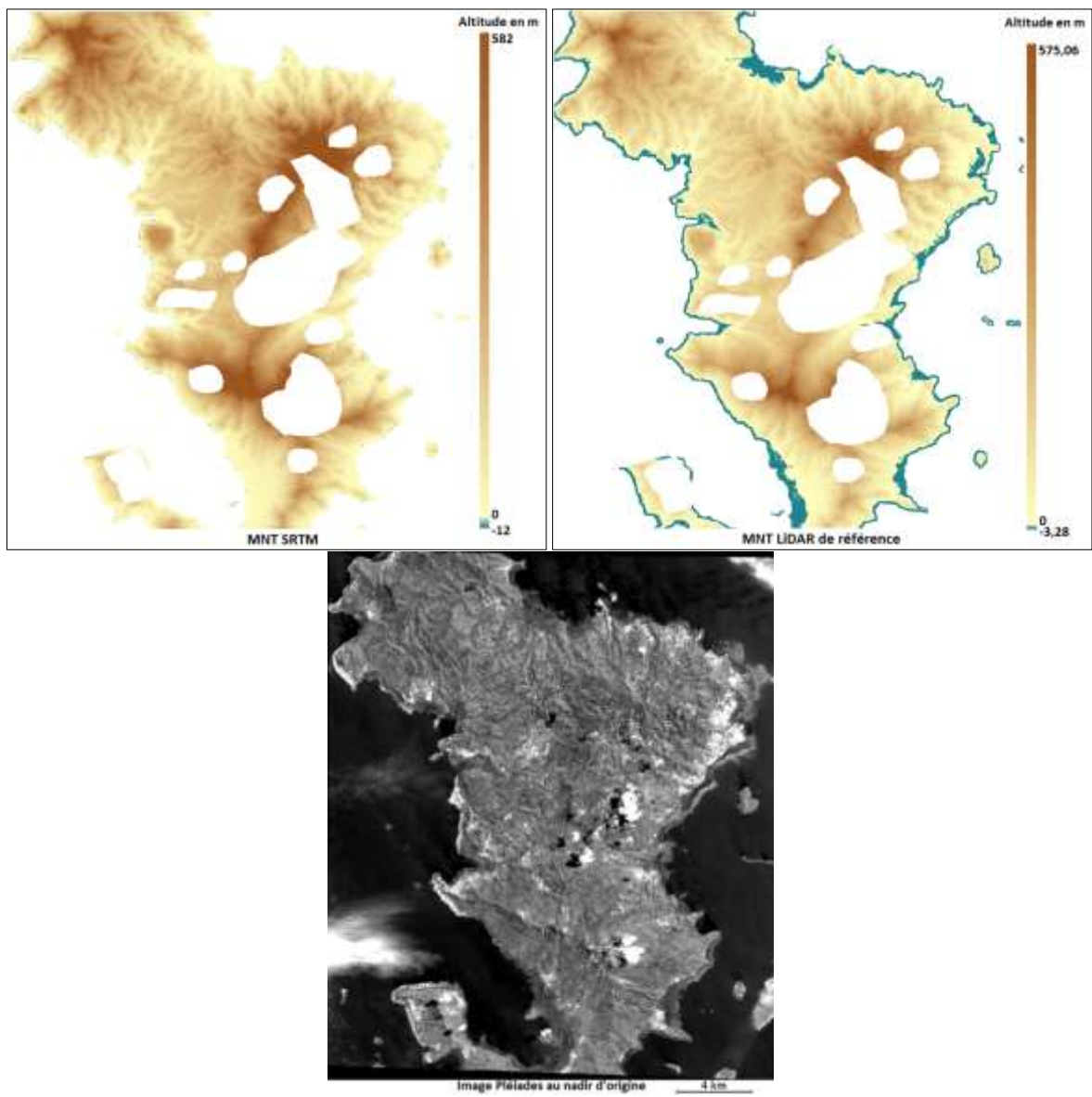
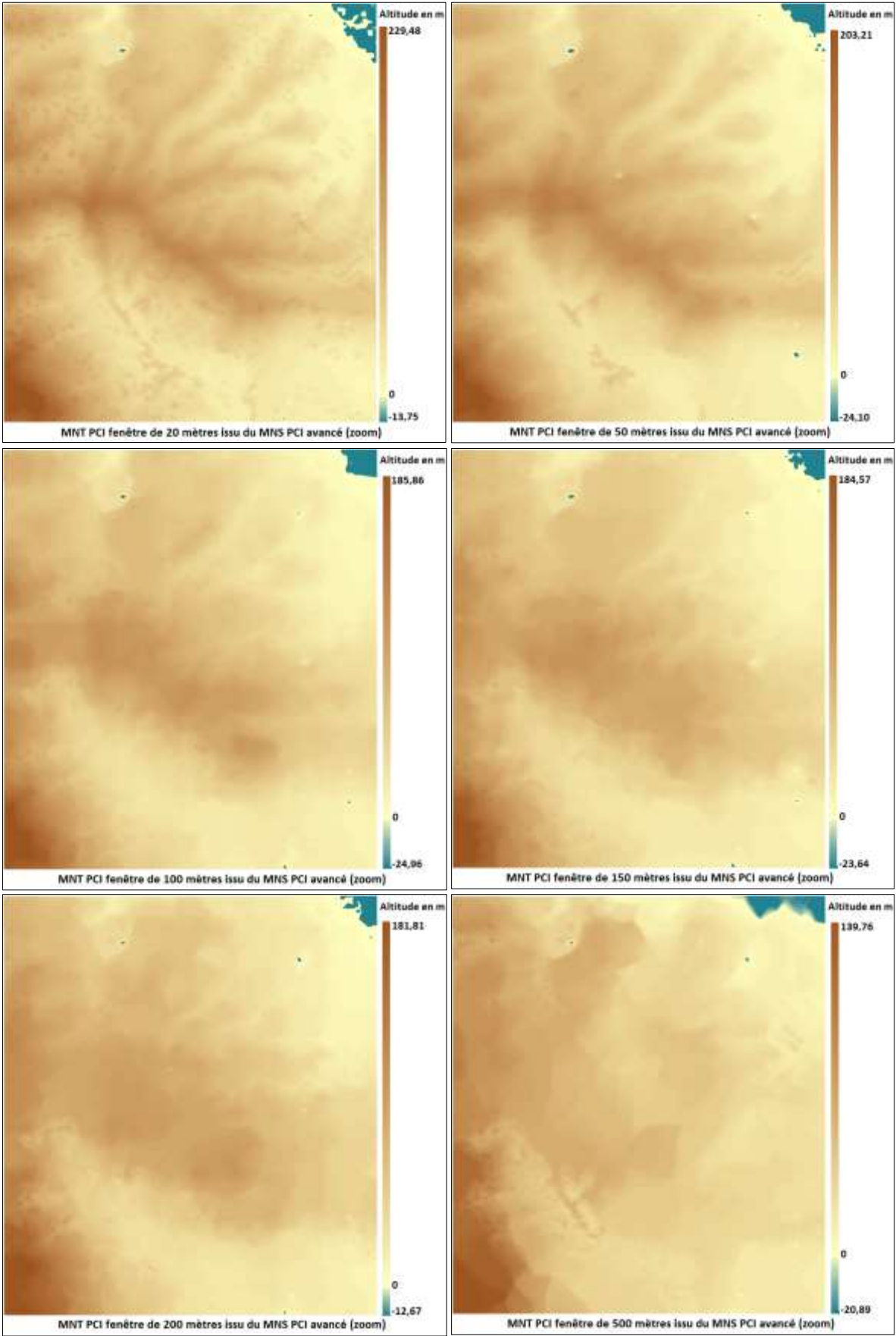


Figure 29 : MNT produits / Zoom sur une portion de 4 km²



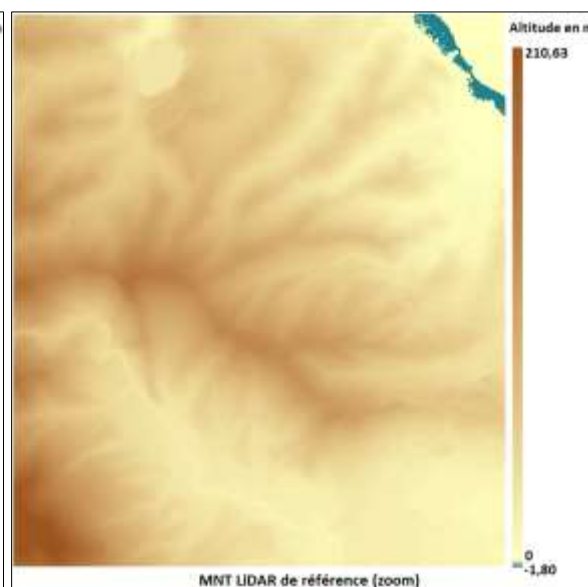
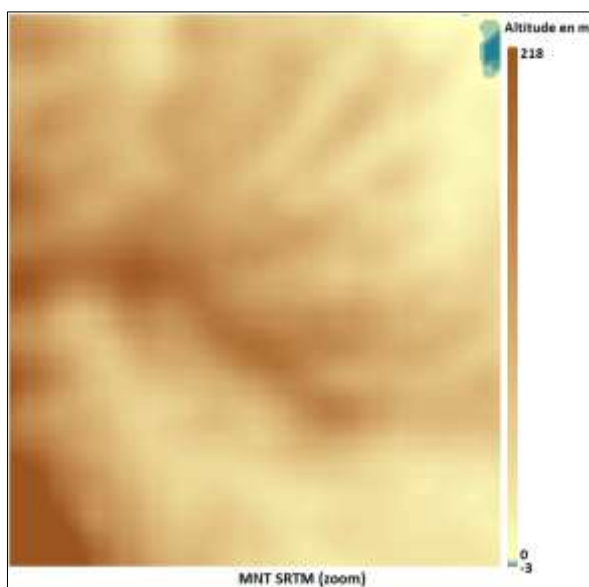
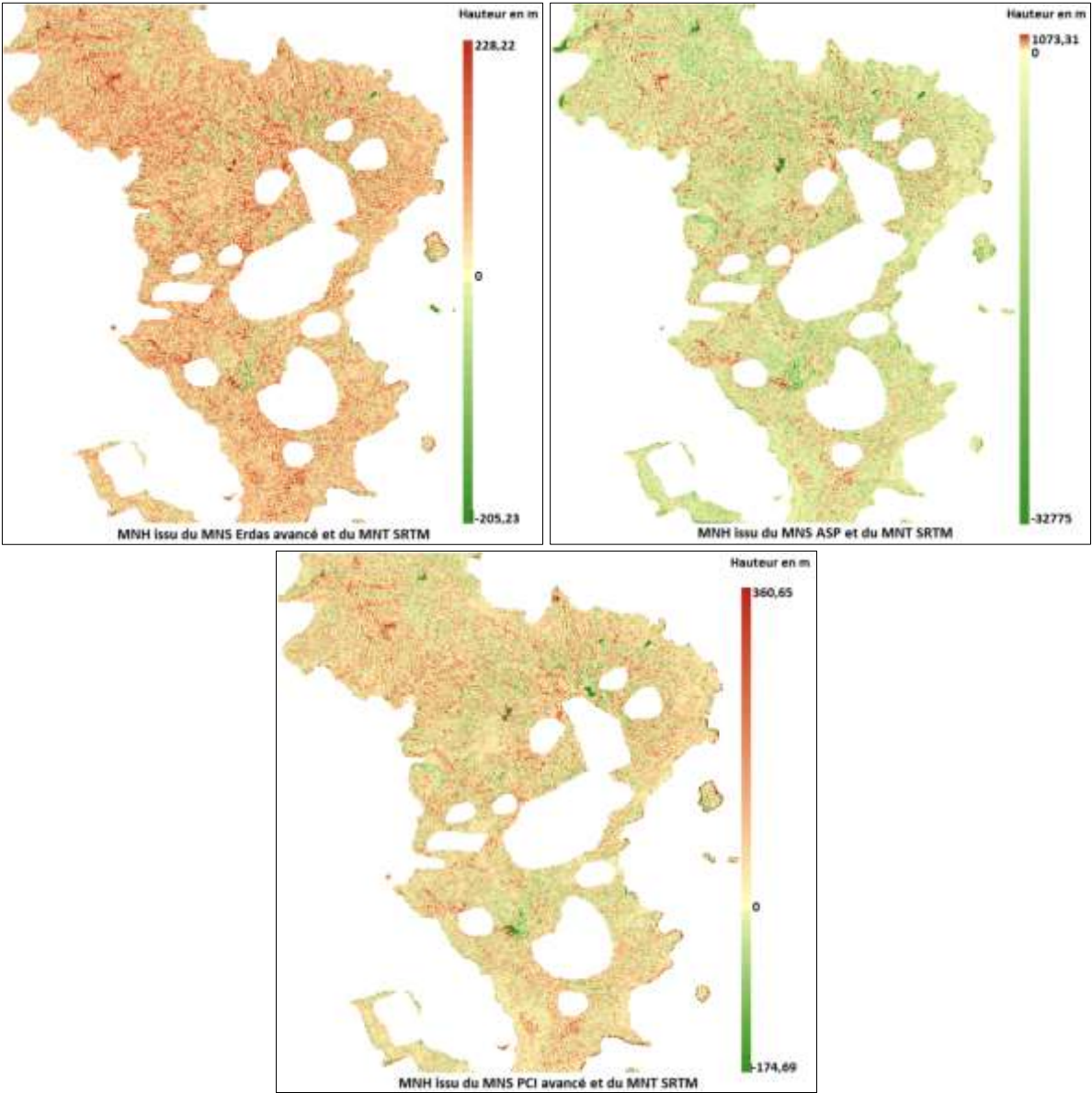


Figure 30 : MNH produits sur l'intégralité de la zone d'étude



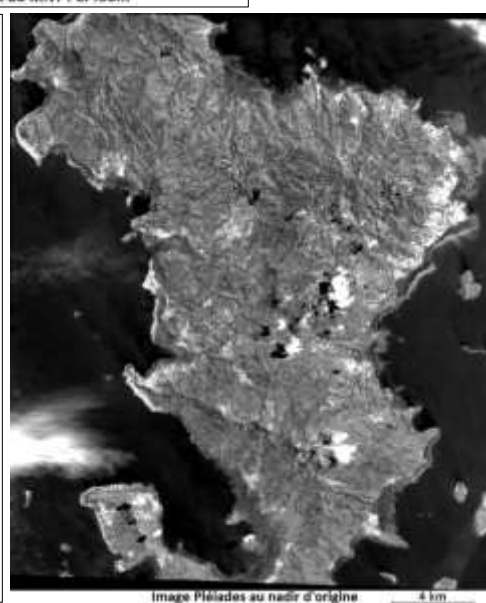
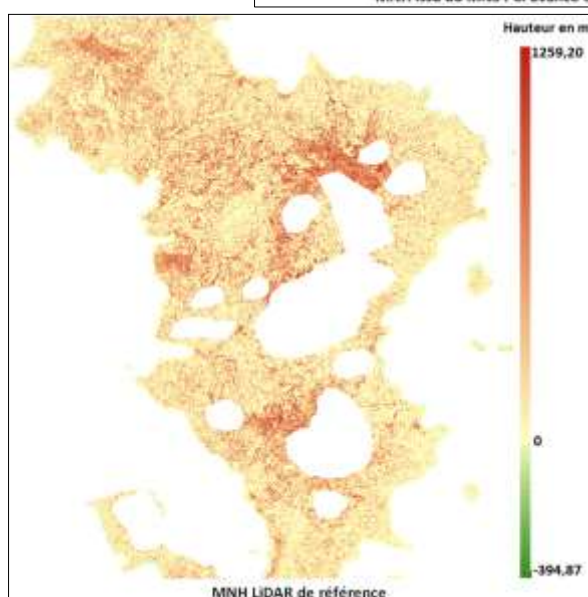
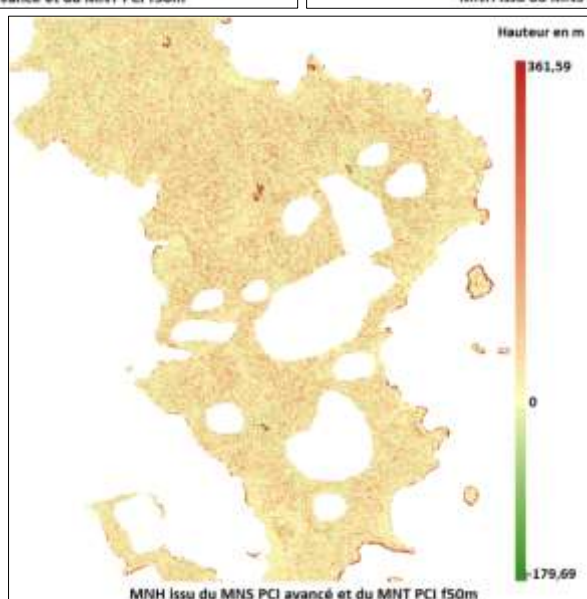
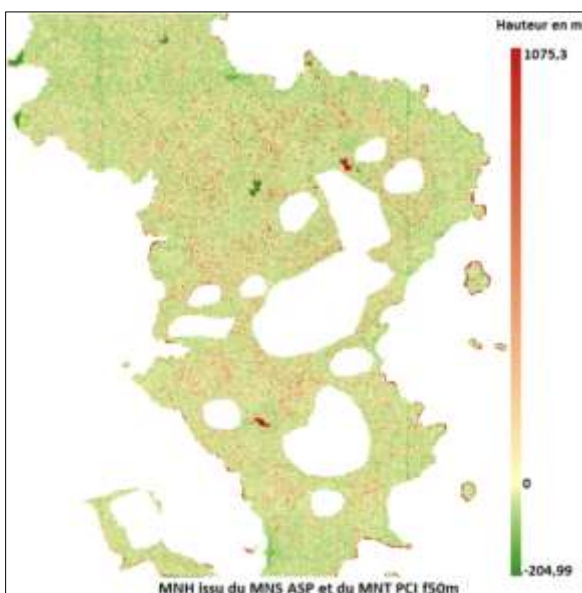
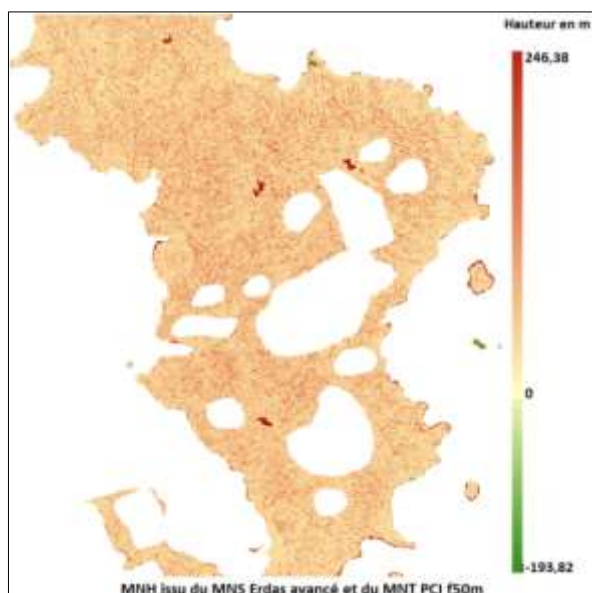
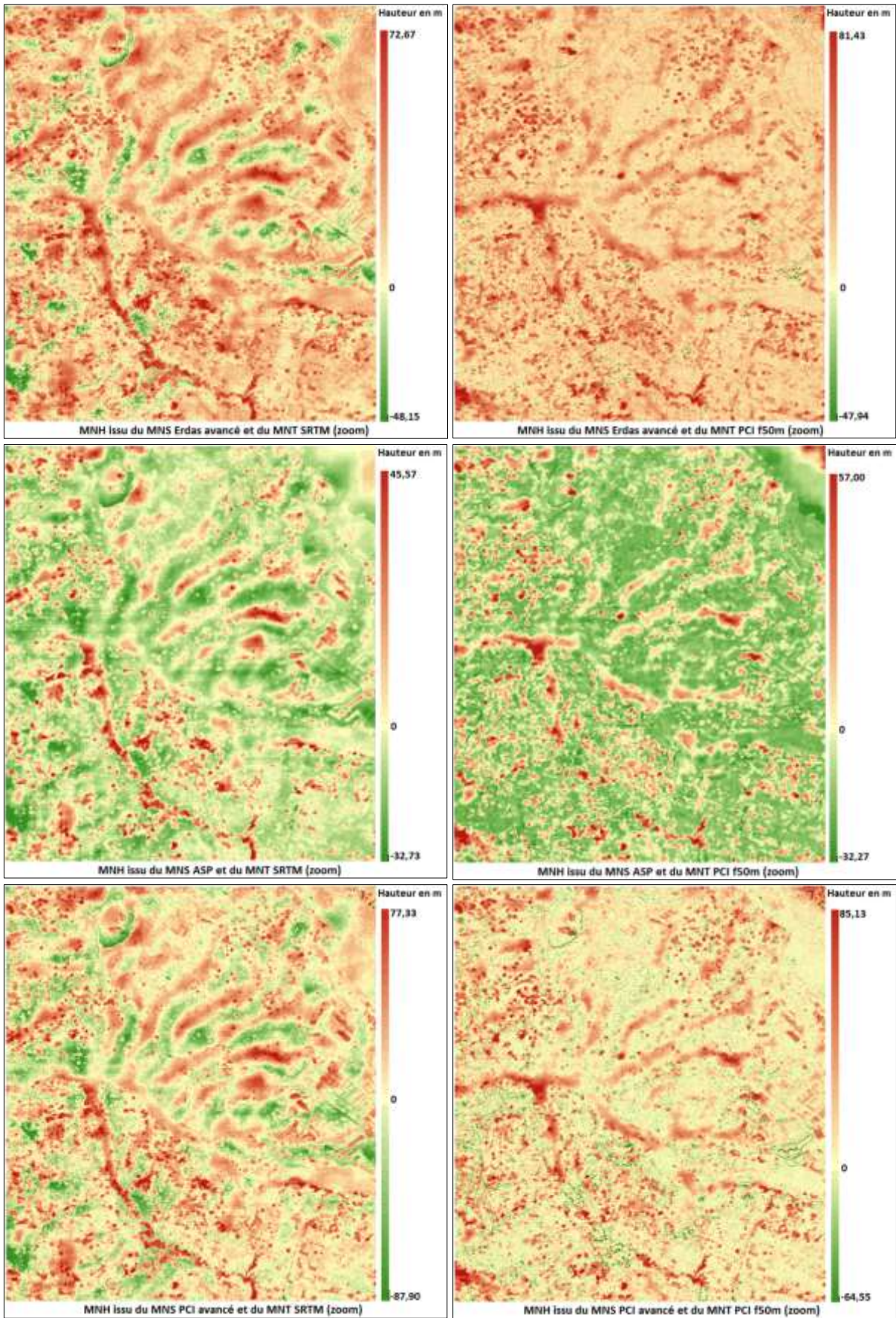


Figure 31 : MNH produits / Zoom sur une portion de 4 km²



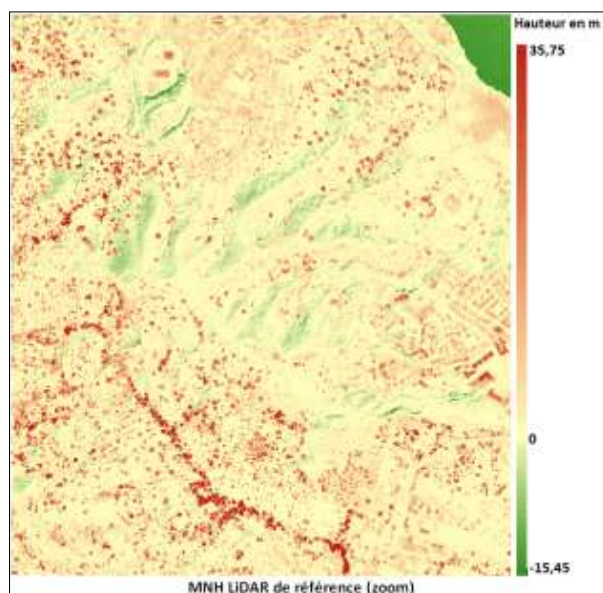
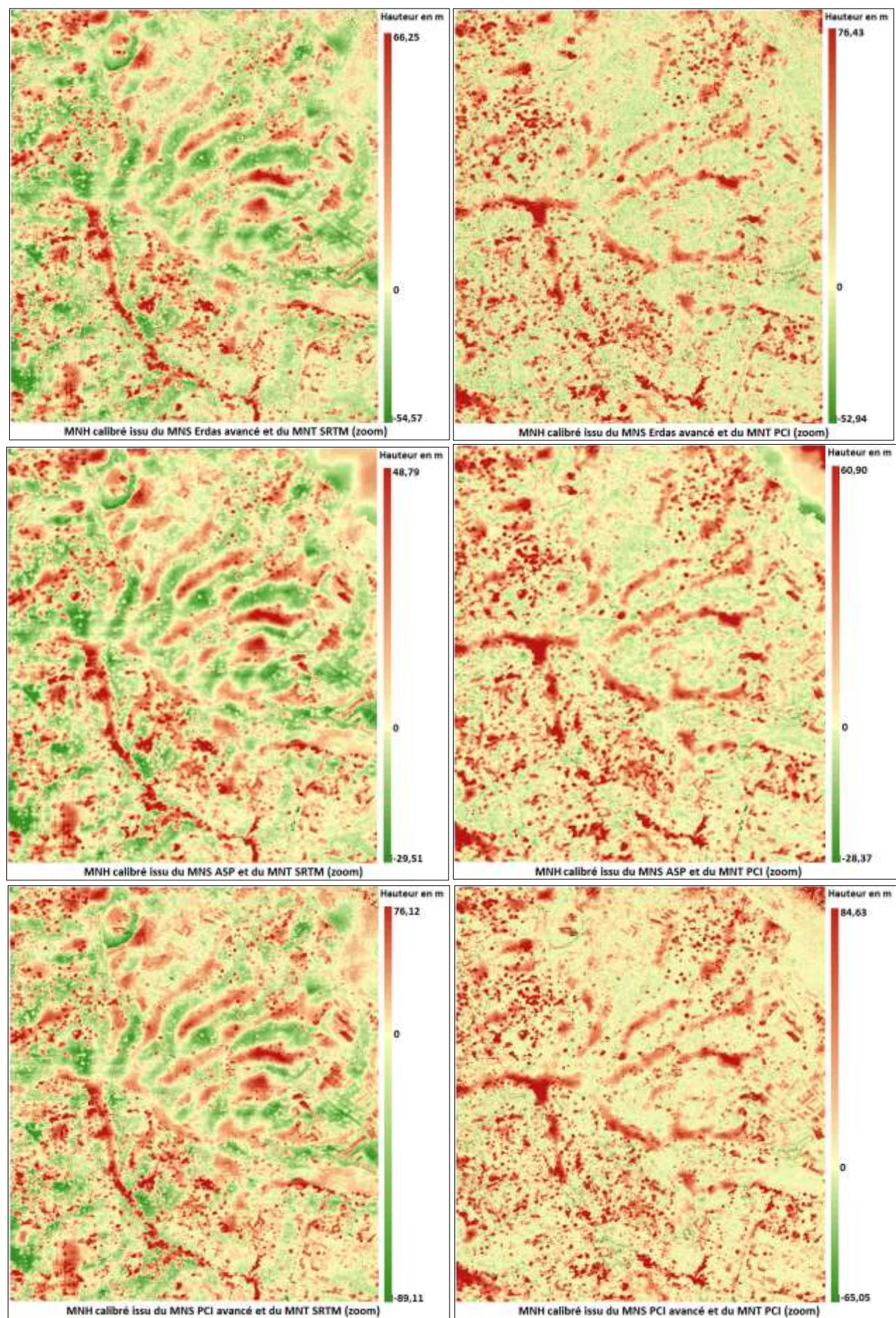
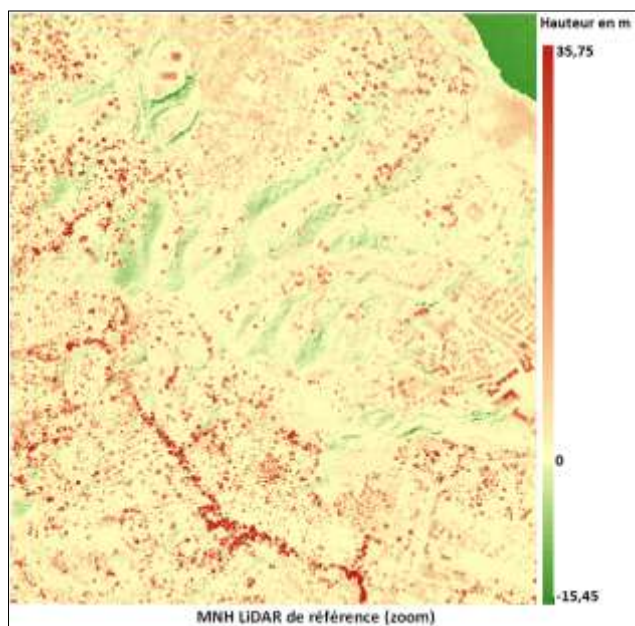


Figure 32: MNH produits calibrés sur la référence LiDAR / Zoom sur une portion de 4 km²





Annexe 7 : Représentation cartographique des tests globaux sur l'île de Mayotte

Figure 33 : Comparaison globale entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Zone test de 4 km²

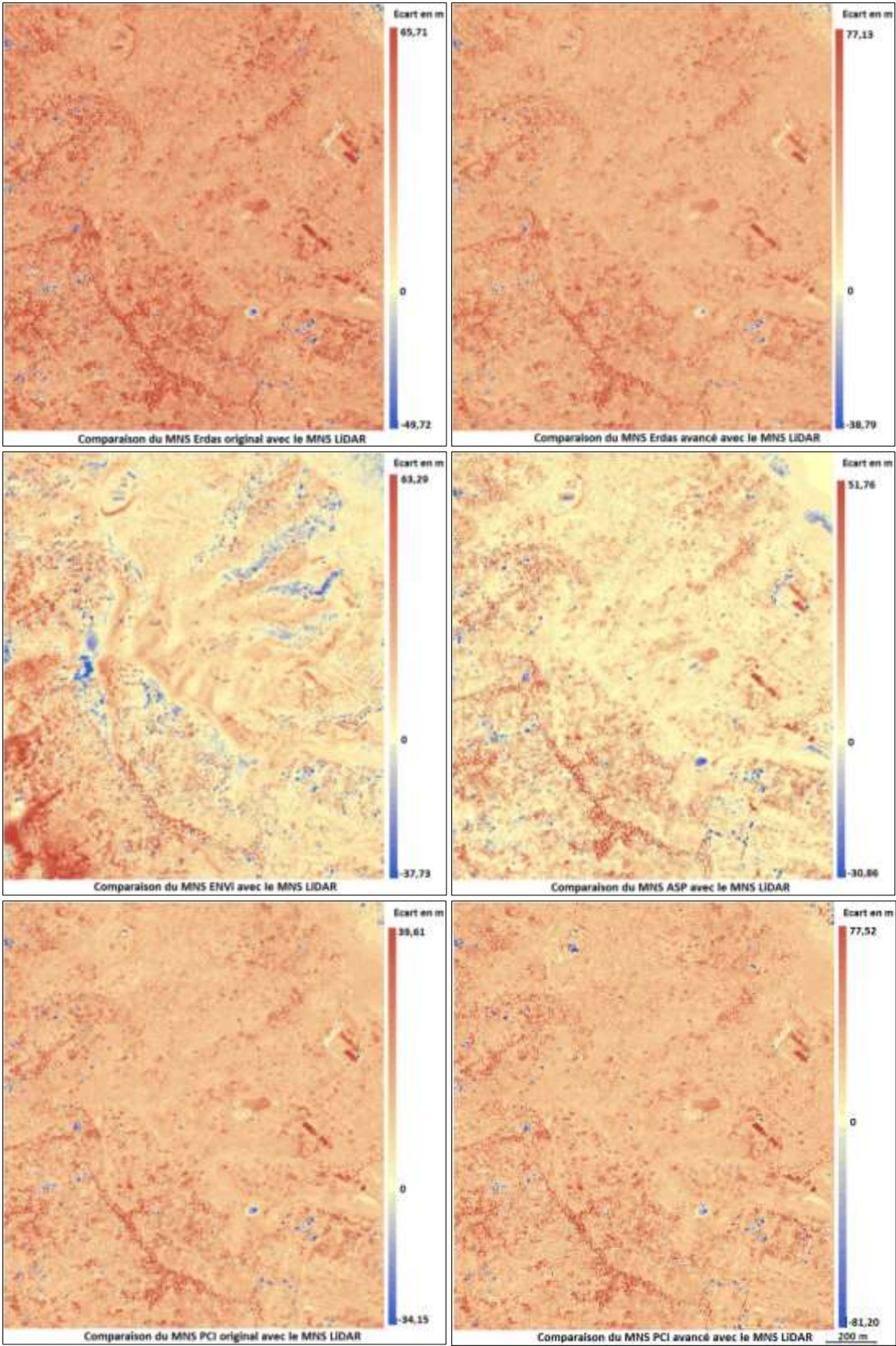


Figure 34: Comparaison globale entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Intégralité de la zone d'étude

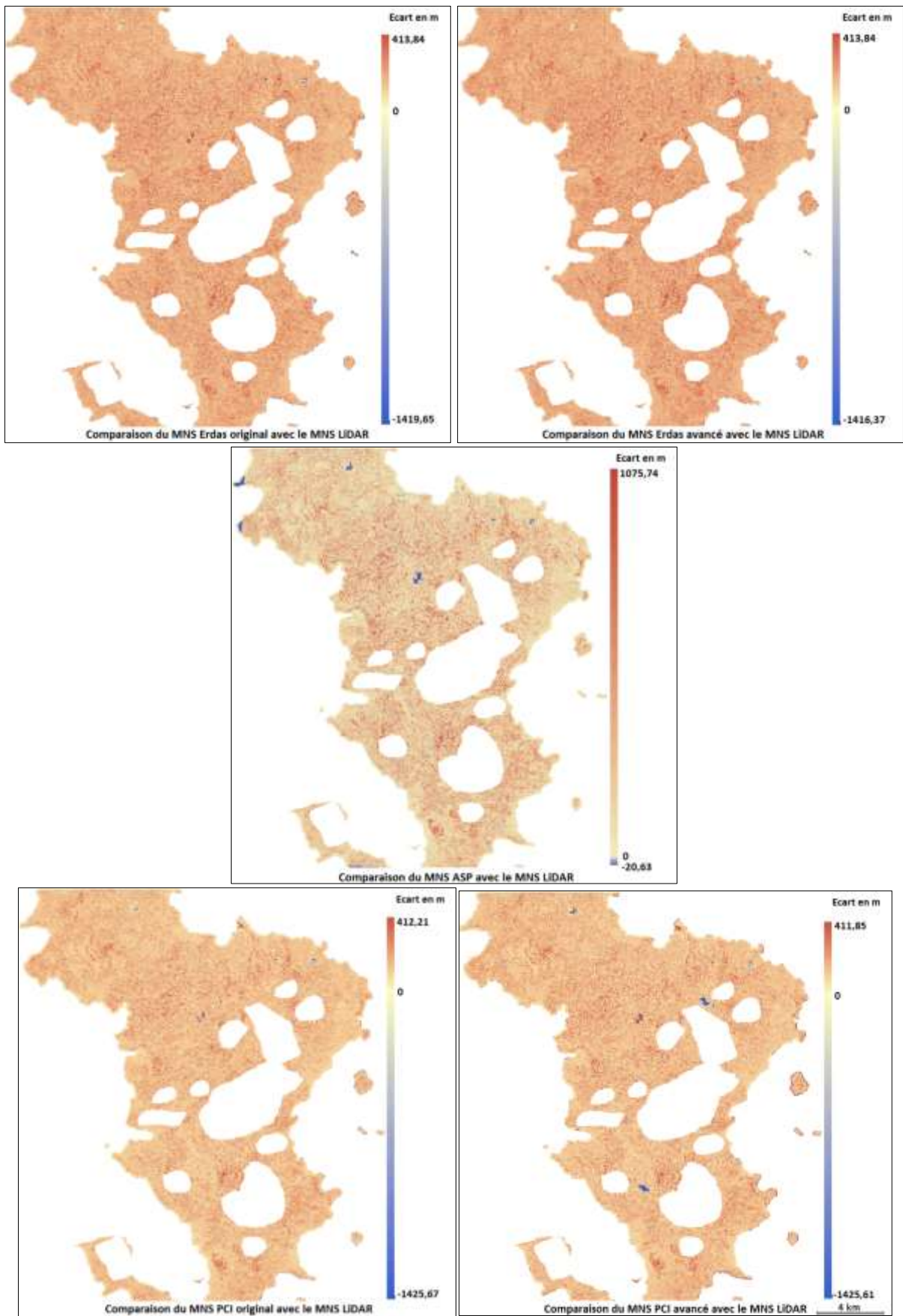
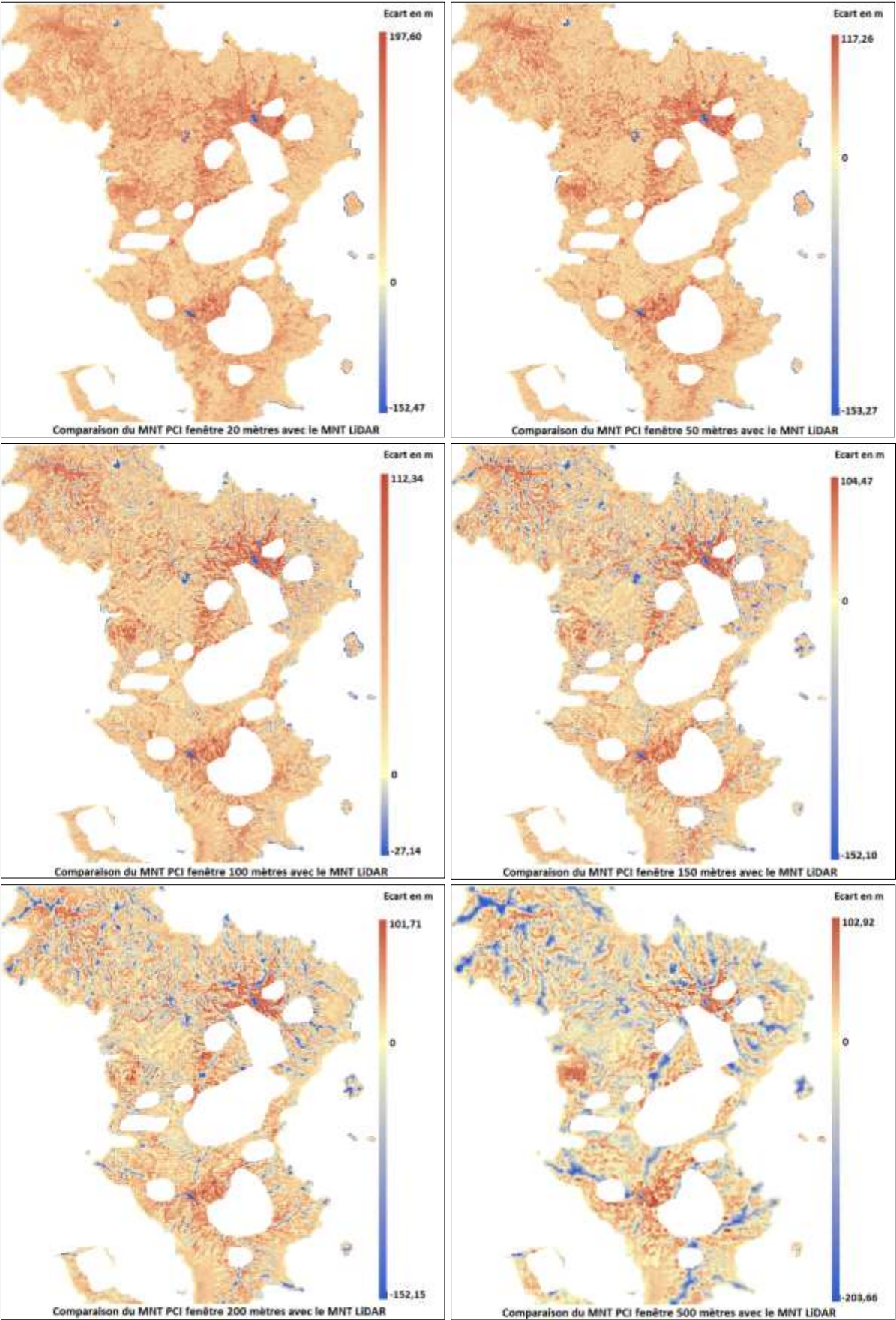


Figure 35 : Comparaison globale entre les MNT produits et le MNT LiDAR / Intégralité de la zone d'étude



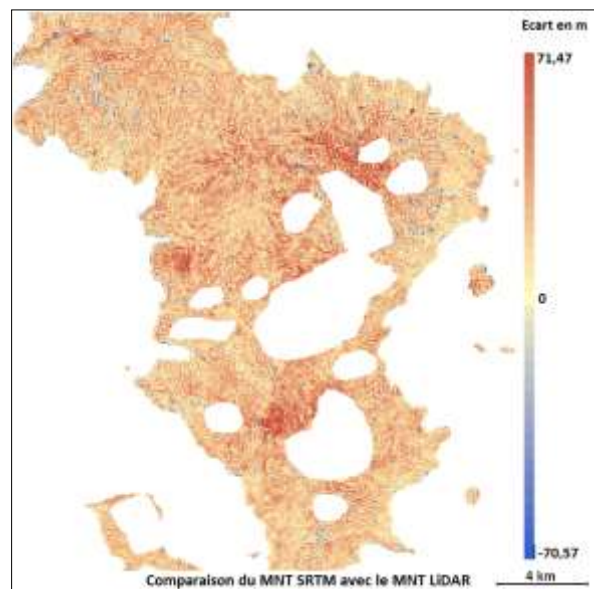
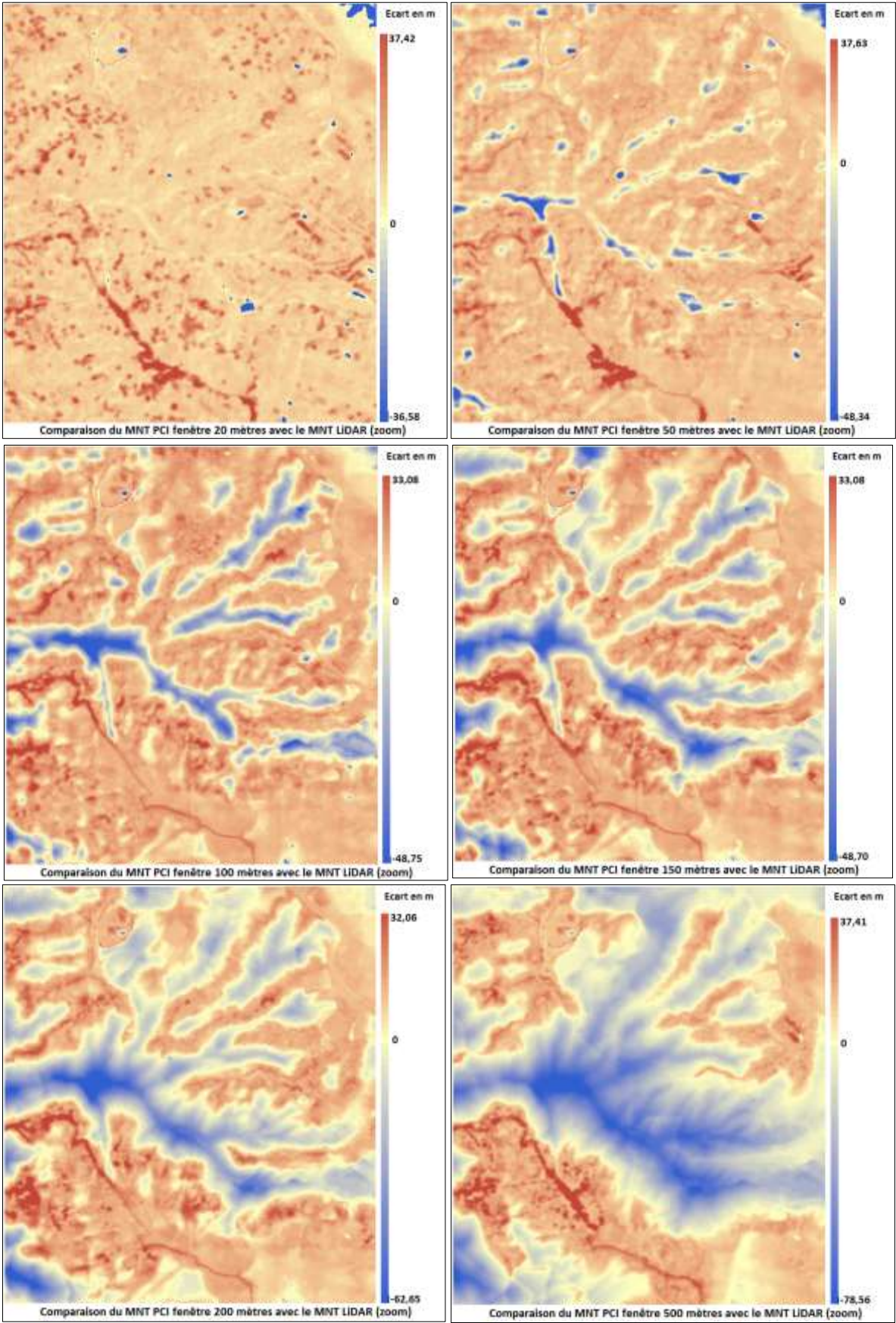


Figure 36 : Comparaison globale entre les MNT produits et le MNT LiDAR / Zoom sur un échantillon de 4 km²



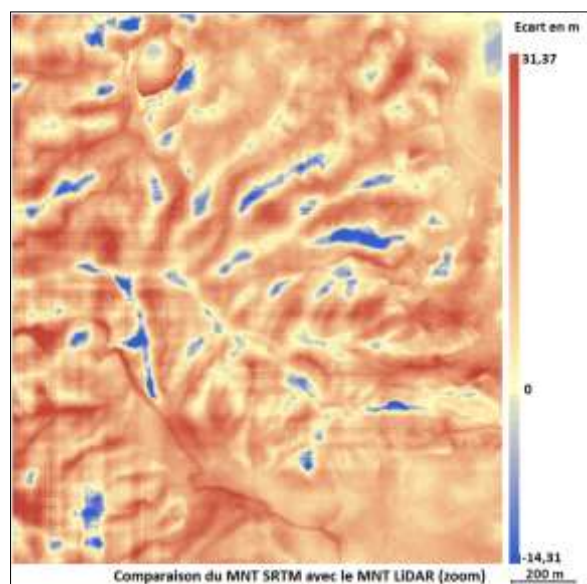


Figure 37 : Comparaison globale entre les MNH produits et le MNH LiDAR / Intégralité de la zone d'étude

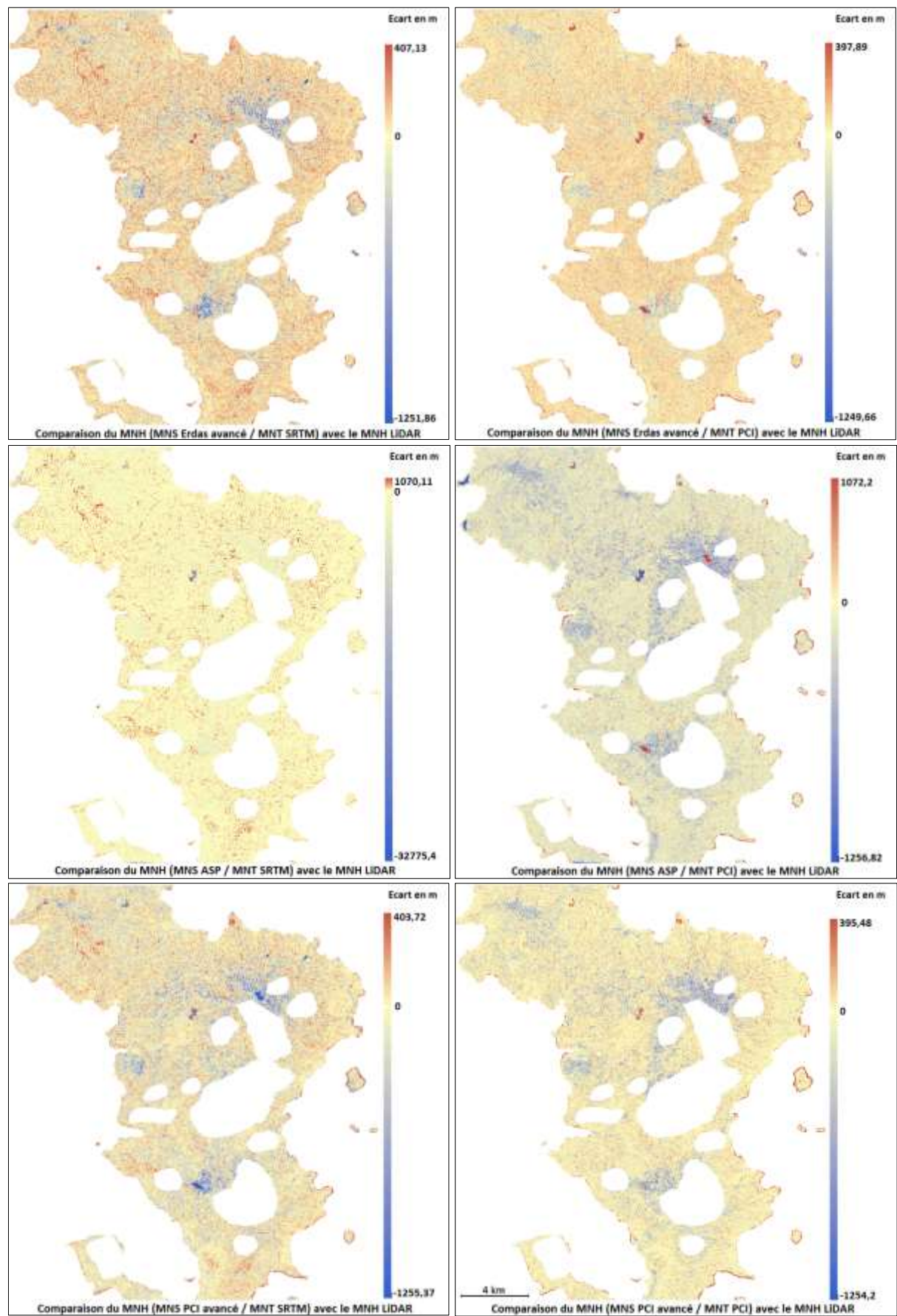


Figure 38 : Comparaison globale entre les MNH produits et le MNH LiDAR / Zoom sur un échantillon de 4 km²

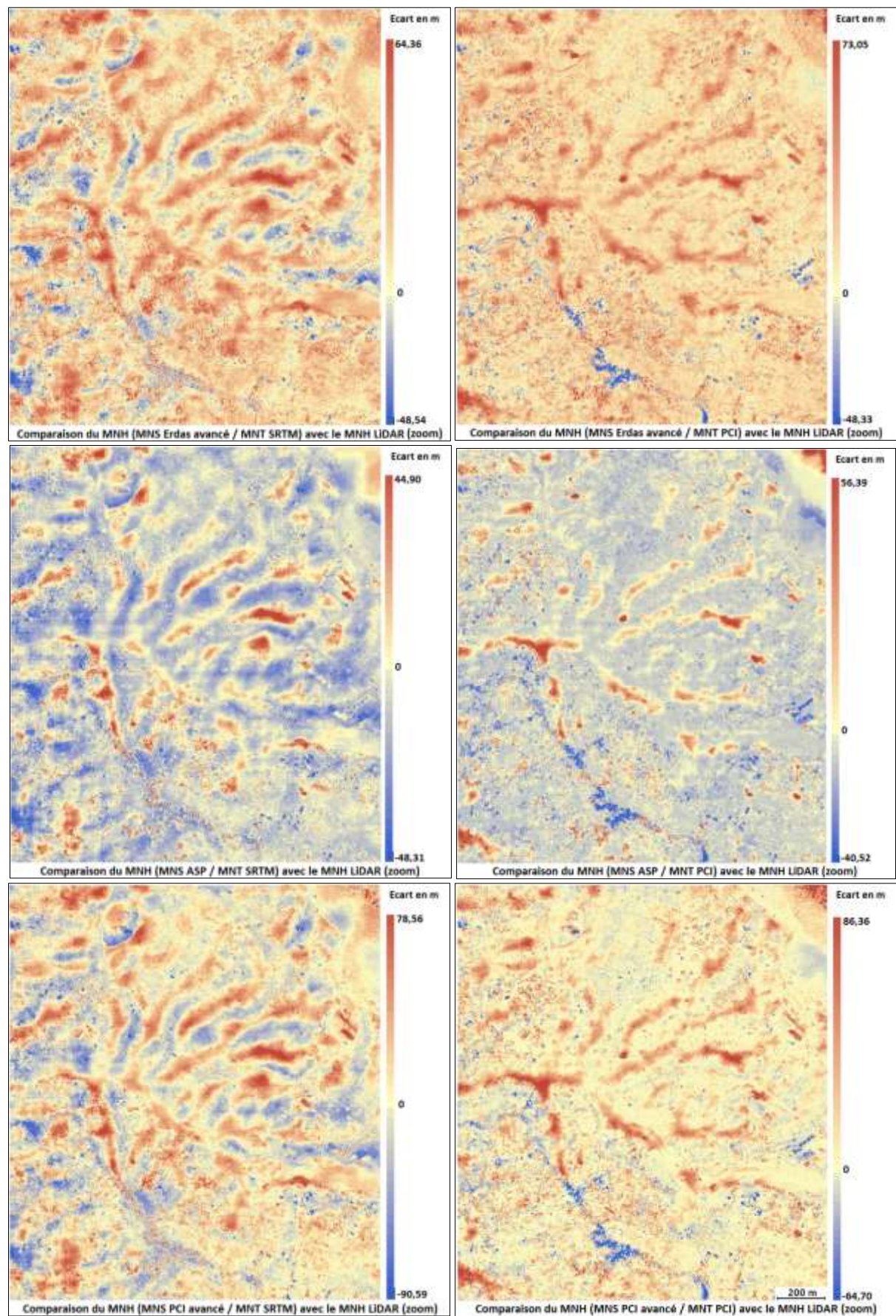
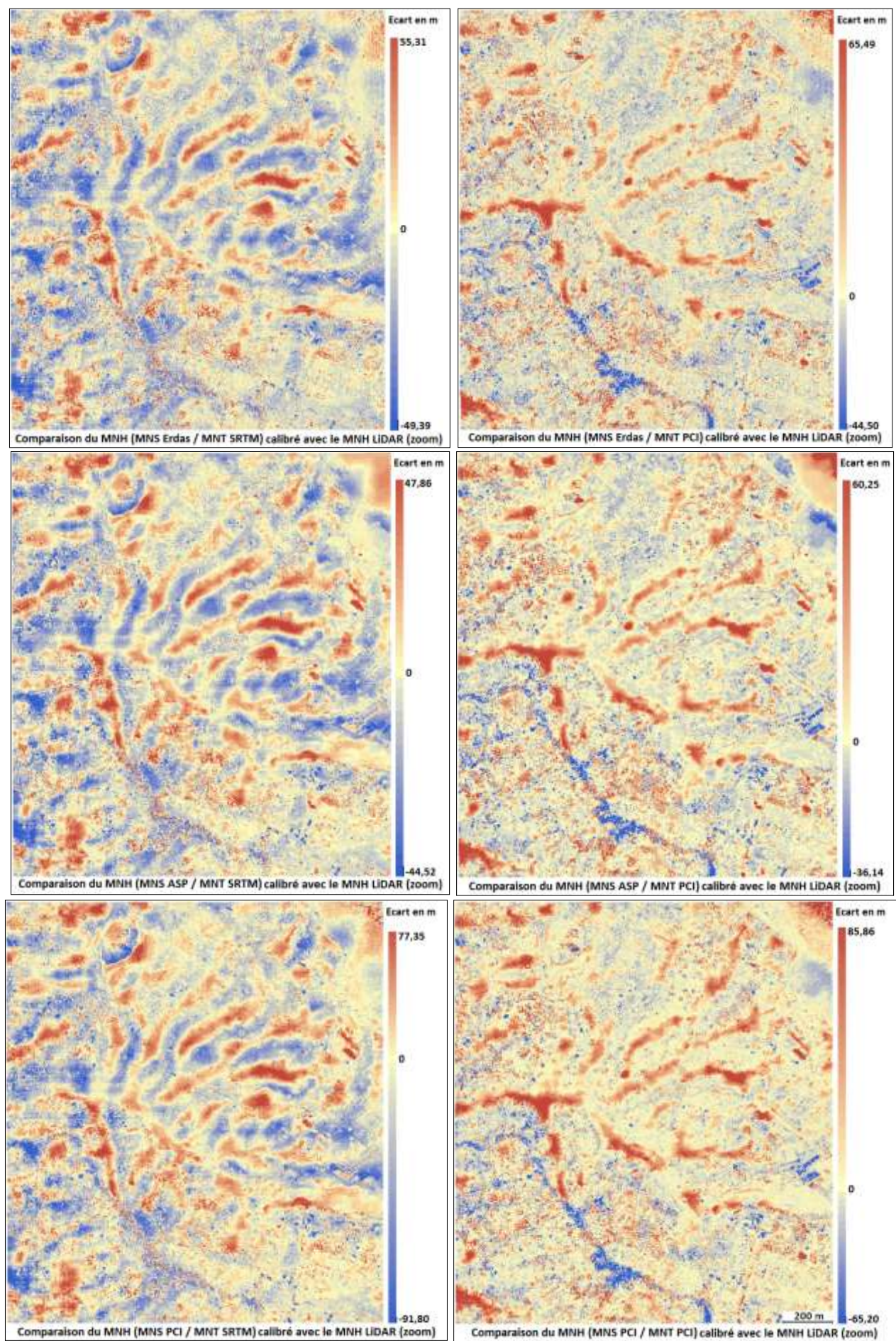


Figure 39 : MNH calibrés sur la référence LiDAR comparés avec le MNH LiDAR / Zoom sur une portion de 4 km²



Annexe 8 : Représentation cartographique des Modèles Numériques obtenus sur la région d'Itatinga au Brésil

Figures 40-20 : MNS produits sur la parcelle-test d'eucalyptus au Brésil (colonne de gauche) et zoom sur un clone (colonne de droite)

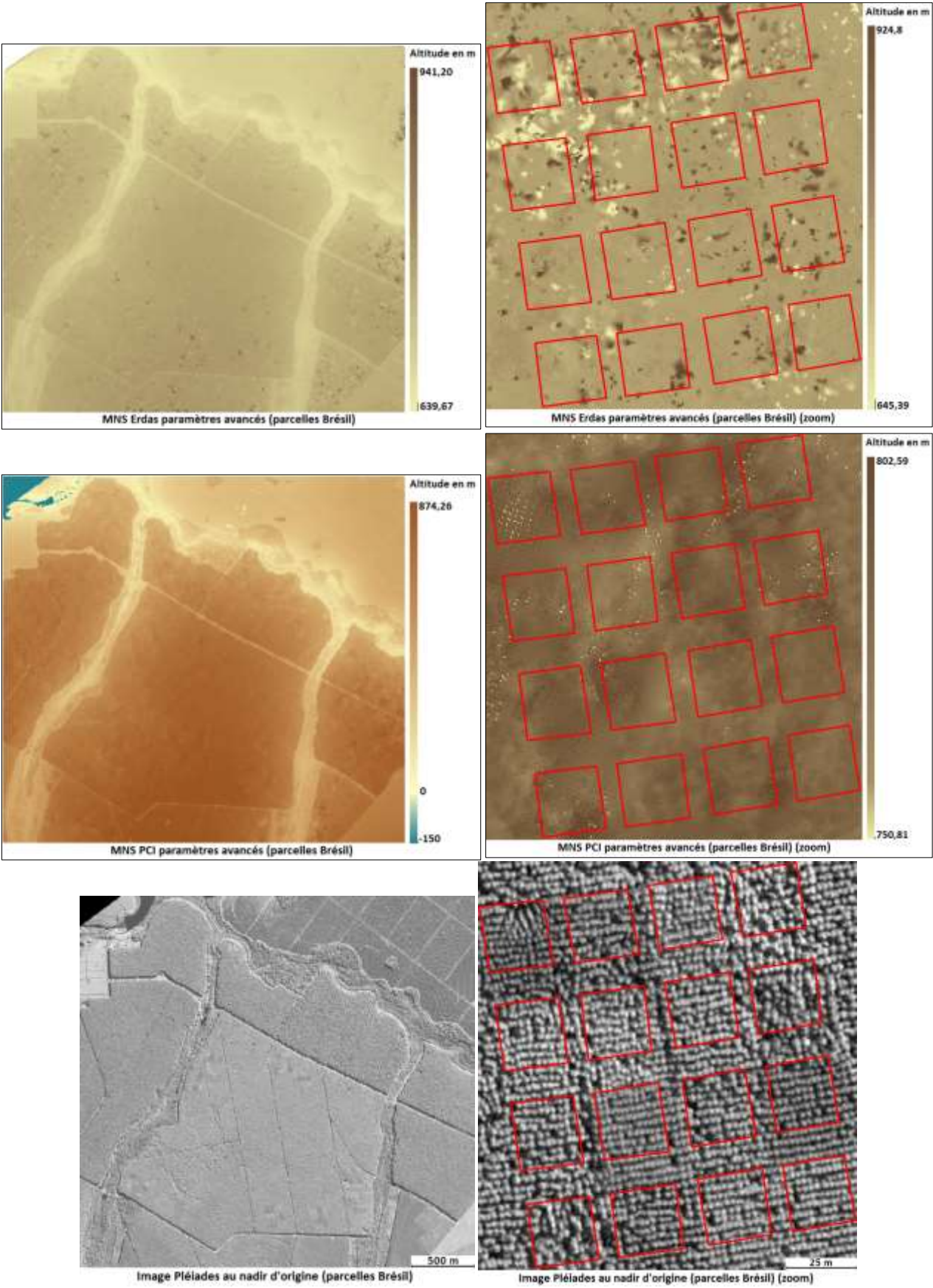


Figure 41 : MNT produits sur la parcelle-test d'eucalyptus au Brésil

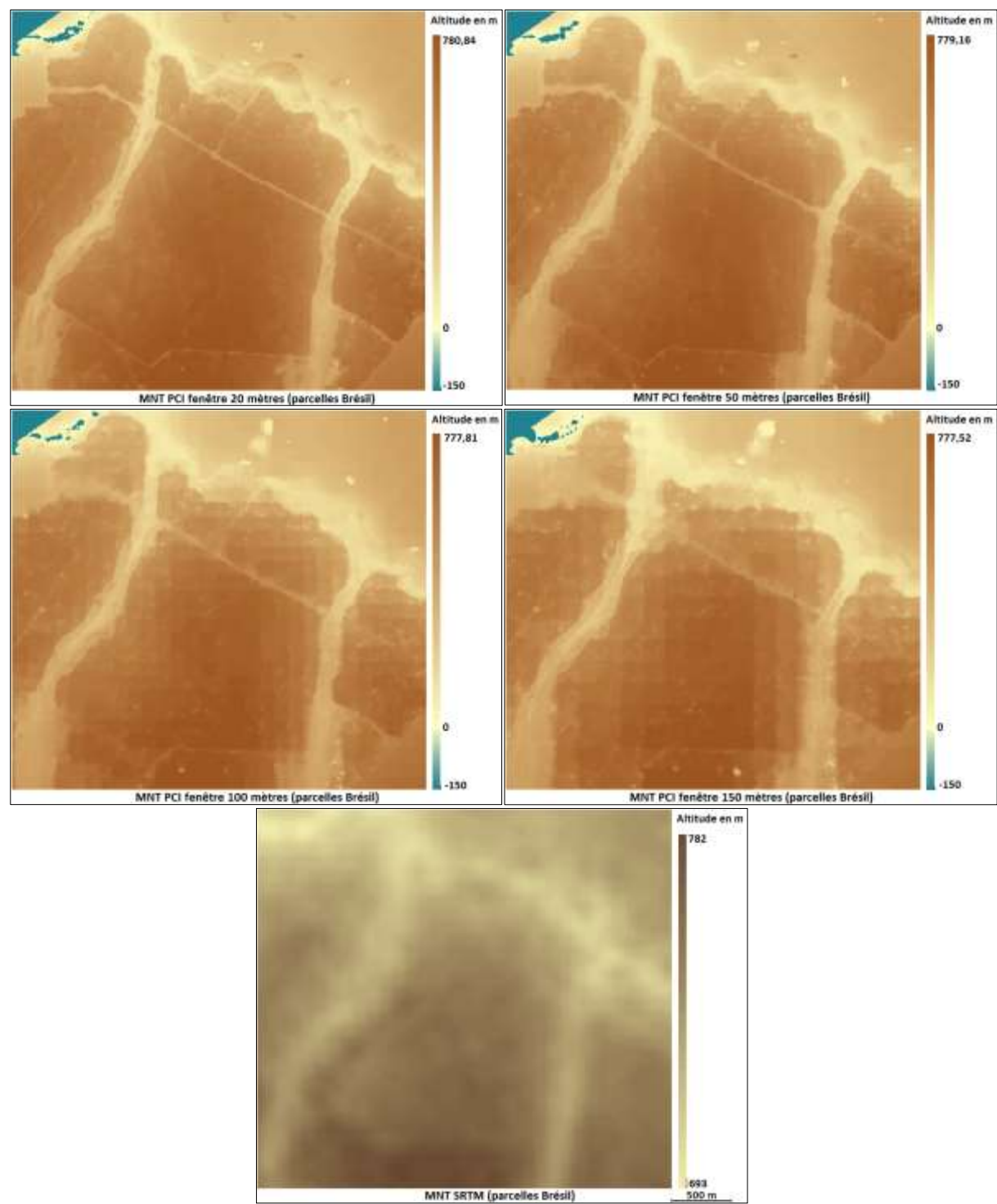


Table des figures des annexes

Figure 1 : Calcul du rapport B/H pour les images Pléiades de Mayotte.....	II
Figure 2 : Illustration des références altimétriques	II
Figure 3 : Répartition des points enregistrés dans la zone test de 4 km ² située au Nord-Est de Mayotte pour comparaison avec les Modèles Numériques LiDAR de référence.....	XIII
Figure 4 : Découpage de la zone d'étude en 15 portions dans chacune desquelles 1 point par type (sol, canopée, bâti) est relevé pour comparaison avec les Modèles Numériques LiDAR de référence	XIV
Figure 5 : MNS produits sur une zone test de 4 km ²	XV
Figure 6 : MNS produits sur l'intégralité de la zone d'étude.....	XVII
Figure 7 : MNT produits sur l'intégralité de la zone d'étude.....	XIX
Figure 8 : MNT produits / Zoom sur une portion de 4 km ²	XXI
Figure 9 : MNH produits sur l'intégralité de la zone d'étude	XXIII
Figure 10 : MNH produits / Zoom sur une portion de 4 km ²	XXV
Figure 11: MNH produits calibrés sur la référence LiDAR / Zoom sur une portion de 4 km ²	XXVII
Figure 12 : Comparaison globale entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Zone test de 4 km ²	XXIX
Figure 13: Comparaison globale entre les MNS produits et le MNS LiDAR / Intégralité de la zone d'étude	XXX
Figure 14 : Comparaison globale entre les MNT produits et le MNT LiDAR / Intégralité de la zone d'étude	XXXI
Figure 15 : Comparaison globale entre les MNT produits et le MNT LiDAR / Zoom sur un échantillon de 4 km ²	XXXIII
Figure 16 : Comparaison globale entre les MNH produits et le MNH LiDAR / Intégralité de la zone d'étude	XXXV
Figure 17 : Comparaison globale entre les MNH produits et le MNH LiDAR / Zoom sur un échantillon de 4 km ²	XXXVI
Figure 18 : MNH calibrés sur la référence LiDAR comparés avec le MNH LiDAR / Zoom sur une portion de 4 km ²	XXXVII
Figures 19-20 : MNS produits sur la parcelle-test d'eucalyptus au Brésil (colonne de gauche) et zoom sur un clone (colonne de droite)	XXXVIII
Figure 21 : MNT produits sur la parcelle-test d'eucalyptus au Brésil.....	XXXIX

Table des tableaux des annexes

Tableau 1 : Données utilisées lors de l'étude.....	III
Tableau 2 : Comparaison des logiciels utilisés.....	V
Tableau 3 : Stratégie d'extraction utilisée sous Erdas.....	VI
Tableau 4 : Paramétrage des éléments de traitement sous Erdas.....	VIII
Tableau 5 : Définition des préférences sous Erdas.....	IX
Tableau 6 : Paramétrage des fichiers en sortie sous Erdas	IX
Tableau 7 : Paramétrage d'extraction du MNS sous ENVI	IX
Tableau 8 : Paramétrage de la fusion des MNS résultants sous Erdas.....	X
Tableau 9: Paramétrage de création du MNS sous le pipeline ASP	X
Tableau 10 : Paramétrage d'extraction du MNS sous PCI	XI
Tableau 11 : Paramétrage de l'opération DSM2DTM	XI

Résumé

Les Modèles Numériques de Hauteur (MNH) renseignent sur la hauteur et la structure des espaces boisés, permettant de les distinguer entre eux. Ces produits peuvent être obtenus à partir d'acquisitions LiDAR à très haute résolution spatiale, qui restent cependant très difficiles à mettre en œuvre dans la plupart des régions du globe. La production de MNH peut toutefois être réalisée à partir d'images satellites tri-stéréoscopiques (trois images acquises simultanément sur la même zone, sous trois angles de vue différents), plus faciles à acquérir, notamment à partir des capteurs Pléiades. Cette étude a donc pour objectifs de développer une méthode de création d'un modèle numérique de surface (MNS) à partir d'images Pléiades tri-stéréoscopiques, puis d'estimer la qualité de ce MNS ainsi que du MNH qui en est dérivé.

Le principal site étudié est l'île de Mayotte, sur lequel nous disposons, en plus des images Pléiades, de données LiDAR. Plusieurs MNS ont ainsi été produits, puis des MNH en ont été dérivés en se basant sur le MNT SRTM. Cette production a été effectuée, à des fins de comparaison, sous différents logiciels commerciaux (Erdas Imagine, ENVI, PCI Geomatica) ou libre (ASP/NASA). Le logiciel PCI donnant la possibilité de dériver un MNT directement à partir d'un MNS, un ensemble de MNH produits à partir du MNT PCI est aussi ajouté à l'analyse. L'ensemble des tests est comparé aux produits LiDAR, qui servent de référence en l'absence de mesures directes (in situ) des hauteurs de végétation. Pour approfondir la validation des résultats, nous avons également étudié un second site, localisé au Brésil, où les MNH produits ont été comparés à des relevés de terrain des hauteurs d'arbre.

Le MNH obtenu intégralement sous PCI donne une estimation générale des hauteurs correcte, sauf sur les formations végétales denses, moins bien reconnues. Les MNH dérivés sous Erdas à partir du MNT SRTM ont des résultats globalement moins bons mais permettent en revanche de bien identifier les formations végétales denses. Finalement, les résultats obtenus sont assez robustes pour servir de base à la production d'une carte d'occupation du sol, ce qui est encourageant pour cette nouvelle technologie.

Mots clés : Pléiades, tri-stéréoscopie, LiDAR, Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain, Modèle Numérique de Hauteur, Mayotte, Brésil, cartographie de la végétation.

Abstract

Normalized Digital Elevation Models (NDSM) inform on the height and the structure of tree covers, useful data for canopy discrimination. This kind of products can be derived from LiDAR acquisitions at very high spatial resolution, but these are still very difficult to be carried out in most regions of the World. But NDSM can also be derived from satellite Tri-stereoscopic imagery (three images of the same frame acquired with different view angles), such as Pléiades' data. This study thus aims at identifying a reproducible methodology that generates a Digital Surface Model (DSM) from Pléiades tri-stereo images, and then to estimate the quality of this DSM and its derived NDSM.

Our principal study site is the island of Mayotte, where we have LiDAR data as a reference. Several DSM were then produced, followed by NDSM derived from these DSM and the SRTM DTM, using different commercial (Erdas Imagine, ENVI, PCI Geomatica) and free (ASP/NASA) softwares to be compared. PCI allowing direct DTM derivation from the DSM, a set of NDSM produced under PCI' DTM were also added to the comparison. The whole set of products is then compared to LiDAR data, the reference in lack of direct measurements of tree heights. To enhance this validation, we also analyzed a site localized in Brazil, where tree heights were measured in the fields.

The PCI-only NDSM gives a good global estimation of heights, except on dense vegetation covers, that are less recognized. The Erdas NDSM, derived from the SRTM DTM, gives less stable global results but is very efficient to recognize the dense vegetation covers. Finally, the results are strong enough to serve as a good basis for the land cover mapping, which is very encouraging for this new technology.

Keywords : Pléiades, tri-stereoscopy, LiDAR, Digital Surface Model, Digital Terrain Model, Normalized Digital Surface Model, Mayotte, Brazil, land cover mapping.